



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV PARAMETRŮ SVAŘOVÁNÍ (U, I) NA PŘENOS KOVU PŘI MIG/MAG SVAŘOVÁNÍ OCELI

INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS (U, I) ON METAL TRANSFER DURING MIG/MAG
WELDING OF STEEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VÁCLAV BARDOŇ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Václav Bardoň

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv parametrů svařování (U, I) na přenos kovu při MIG/MAG svařování oceli

v anglickém jazyce:

Influence of welding parameters (U,I) on metal transfer during MIG/MAG welding of steel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Velikost napětí a proudu významně ovlivňuje chování kovu elektrody v průběhu jejího tavení a přenosu obloukem do svarového kovu spoje, vzhled, geometrii a kvalitu svaru.

Cíle bakalářské práce:

Rozbor sil působících na kapku roztaveného kovu v elektrickém oblouku. Základní typy přenosu kovu. Závislosti přenosu na svařovacích parametrech.

Seznam odborné literatury:

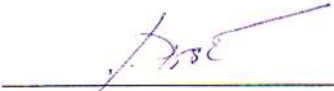
1. Kolektiv autorů. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0
2. ONDREJČEK, P. Zváranie ocelí v ochrane plynov. Bratislava. ETERNA PRESS 2003. 202 s. ISBN 80-968359-5-5
3. ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3
4. Kolektiv autorů. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: ZEROSS 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3
5. Firemní podklady AGA a LINDE


Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.



prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Zabýval jsem se metodou svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou v ochranném inertním nebo aktivním plynu MIG/MAG. Nejprve jsou popsány síly působící na kapku kovu, v další části se tato práce věnuje základnímu rozdělení elektrických oblouků a přenosům kovu. V poslední části se práce věnuje vlivu napětí a proudu na velikost pracovních oblastí pro různé typy přenosu kovu a jejich důsledky na kvalitu a tvar svaru.

Klíčová slova

GMAW, MIG/MAG, typy přenosu kovu, vliv sil na kapku kovu, vliv napětí a proudu na přenos kovu

ABSTRACT

I was concerned with welding method of gas metal arc welding at inert or active shielding gas MIG/MAG. First of all are described forces interacting with drop of metal inside arc, other part of bachelor work is addicted to basic separation of electric arcs and metal transfers. The last part is addicted to the influence of welding voltage and current for size of welding work areas in different metal transfers and their effects for quality and shape of welding joint.

Keywords

GMAW, MIG/MAG, metal transfer modes, influence of forces interacting with metal drop, influence of voltage and current for metal transfer

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BARDONĚ, V. *Vliv parametrů svařování (U , I) na přenos kovu při MIG/MAG svařování oceli*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 41 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci na téma *Vliv parametrů svařování (U , I) na přenos kovu při MIG/MAG svařování oceli* jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené odborné literatury a pramenů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

Datum

.....

Jméno a příjmení bakaláře

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce a také za poskytnutí odborné literatury a podkladů.

Také bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu a pochopení při psaní této bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Čestné prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
1. CHARAKTERISTIKA PROCESU MIG/MAG SVAŘOVÁNÍ.....	10
1.1 MIG (METAL INERT GAS)	10
1.2 MAG (METAL ACTIVE GAS).....	10
1.3 POPIS ČÁSTÍ MIG/MAG SVAŘOVACÍHO ZAŘÍZENÍ.....	11
1.4 MECHANISMUSY PODÁVÁNÍ DRÁTU	13
1.4.1 Jednokladkový posuv.....	13
1.4.2 Dvoukladkový posuv	14
1.4.3 Čtyřkladkový posuv.....	14
2. PŘÍDAVNÉ MATERIÁLY	15
3. OCHRANNÉ PLYNY	16
3.1 ARGON.....	17
3.2 HÉLIUM.....	17
3.3 KYSLÍK	17
3.4 OXID UHLIČITÝ	18
4. SÍLY PŮSOBÍCÍ NA KAPKU SVAROVÉHO KOVU	19
4.1 GRAVITAČNÍ SÍLA.....	20
4.2 HYDRODYNAMICKÁ SÍLA	20
4.3 ELEKTROMAGNETICKÁ SÍLA	21
4.4 SÍLA VYVOLANÁ TLAKEM KOVOVÝCH PAR	24
4.5 SÍLA POVRCHOVÉHO NAPĚTÍ.....	24
5. ZÁKLADNÍ TYPY PŘENOSU KOVU	25
5.1 ZKRATOVÝ PŘENOS.....	26
5.1.1 Zkratový přenos s krátkým obloukem	27
5.1.2 Zrychlený přenos zkratový s krátkým obloukem.....	27
5.2 BEZZKRATOVÝ PŘENOS	27
5.2.1 Přechodový dlouhý oblouk s nepravidelnými zkraty.....	28
5.2.2 Dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem	28
5.2.3 Impulzní bezzkratový oblouk.....	29

5.2.4 Moderovaný bezzkratový přenos.....	31
5.2.5 Dlouhý oblouk s rotujícím přenosem.....	31
6. ZÁVISLOST NAPĚTÍ A PROUDU (U, I) NA TYP PŘENOSU KOVU.....	32
6.1 OBECNÝ VLIV SVAŘOVACÍHO NAPĚTÍ.....	32
6.2 OBECNÝ VLIV SVAŘOVACÍHO PROUDU.....	32
6.3 VLIV (U, I) NA TYP PŘENOSU KOVU.....	35
6.4 VLIV (U, I) NA HODNOTU VNESENÉHO TEPLA DO OBLOUKU.....	36
6.5 VLIV (U, I) NA VELIKOST PRŮTOKU PLYNU	37
6.6 VLIV (U, I) NA RYCHLOST PODÁVÁNÍ ELEKTRODY	37
Závěr.....	38
Seznam použité literatury	39
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	40

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce bude snaha popsat účinky vlivu charakteristik napětí a proudu na přenos kovu pro metody MIG (metal inert gas) a MAG (metal active gas) neboli svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou v ochranném inertním nebo aktivním plynu. Dnes patří mezi nejdynamičtější se rozvíjející a rozšiřující se odvětví z technologií svařování, jelikož hnacími silami jsou automobilový, letecký a lodní průmysl, taktéž svařování tlakových nádob, potrubí a mostních konstrukcí, stejně jako stavebnictví. Dále k rozvoji těchto metod svařování přispívá i rozvoj výpočetní techniky, možnosti automatizace, nové poznatky v možnostech modelování svářečského procesu, rovněž velký výběr přídavných materiálů a cenová dostupnost ochranných plynů. Mezi další metody svařování elektrickým obloukem dále patří GTAW, FCAW, MMAW, SAW, GMAB a PAW, které ale nejsou obsahem této bakalářské práce.



Svařovací hubice a ochranný plyn při svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou (MIG/MAG) [7]



Ukázka poloautomatického svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou [8]

1. CHARAKTERISTIKA PROCESU MIG/MAG SVAŘOVÁNÍ

GMAW (gas metal arc welding) je proces obloukového svařování, při kterém dochází ke spojení kovů pomocí elektrického oblouku tavící se elektrodou za přítomnosti ochranného plynu, který se externě dodává nejčastěji formou tlakových lahví. Využívá se stejnosměrného proudu. Ochrannými plyny jsou oxid uhličitý a argon, který se používá nejčastěji ve směsi buď s kyslíkem, oxidem uhličitým, oxidem uhelnatým, heliem anebo oxidem dusnatým. Volba ochranného plynu se nejčastěji volí na základě svařovaného materiálu, ale také v závislosti na požadovaném přenosu kapek kovu, rozstřiku, rozsahu probíhajících chemických reakcí a teplotních poměrech uvnitř oblouku. Tavící se elektroda se také volí na základě svařovaného materiálu a je nejčastěji ve formě drátu namotaného na cívce o nejběžnější hmotnosti kolem 15 kg. Stejně jako ochranný plyn má i elektroda významný vliv na procesy probíhající v oblouku. Při svařování vysokými proudy a napětími po dlouhou dobu je nezbytné svařovací hubici chladit. Velkou výhodou těchto metod je poloautomatický režim podávání přídatného drátu, velký výběr ochranných plynů a přídatných materiálů i vhodnost metod k mechanizaci a robotizaci. Nejdůležitějšími proměnnými, které ovlivňují hloubku závaru, geometrii svarové housenky a celkovou kvalitu svařování jsou: [1, 2]

- svařovací proud,
- polarita zapojení hubice a svařovaného materiálu,
- svařovací napětí (délka oblouku),
- rychlost podávání elektrody,
- výlet elektrody z kontaktní špičky,
- orientace elektrody (úhel svařování),
- průměr elektrody.

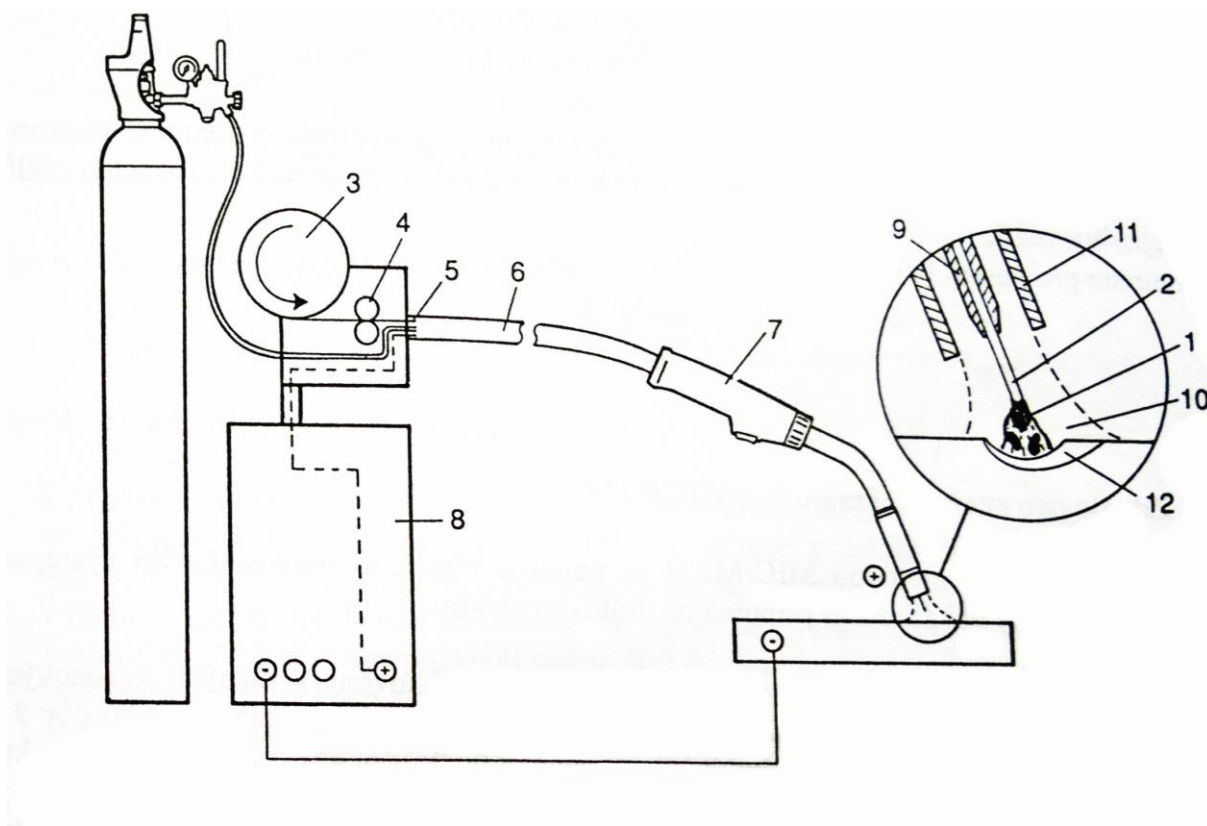
1.1 MIG (METAL INERT GAS)

Obloukové svařování tavící se elektrodou je založeno na principu hoření elektrického oblouku v ochranném inertním plynu mezi tavící se elektrodou ve formě drátu namotaného na cívce a základním materiálem, jímž jsou nejčastěji titan nebo slitiny hliníku, mědi a cínu. Z názvu metody je patrné, že ochranný plyn je inertní (netečný, nereagující, nečinný) a jako takový chrání svarovou lázeň před oxidačními účinky atmosférického vzduchu. Inertní plyny, jimiž jsou argon (Ar) a helium (He), jsou používány buď každý samostatně, anebo častěji ve formě směsí v různých poměrech každého z těchto prvků. [1, 2]

1.2 MAG (METAL ACTIVE GAS)

Jedná se také o obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu, jenž, jak už plyne z názvu, je na rozdíl od předchozí metody aktivní tzn., že má oxidační charakter. Nejsilnější oxidační účinek má čistý (CO_2) buď čistý nebo jako směs s kyslíkem (O_2). Jelikož argon (Ar) má inertní charakter, tak ve směsi s oxidem uhličitým (CO_2) a kyslíkem (O_2) je celkový účinek pouze mírně oxidační. Nejčastěji svařovanými materiály jsou vysokolegované austenitické oceli, feritické oceli, uhlíkové, nelegované a nízkolegované oceli. Tato metoda je velmi rozšířená i díky cenové dostupnosti oxidu uhličitého, který je v porovnání s inertními plyny levnější. [1, 2]

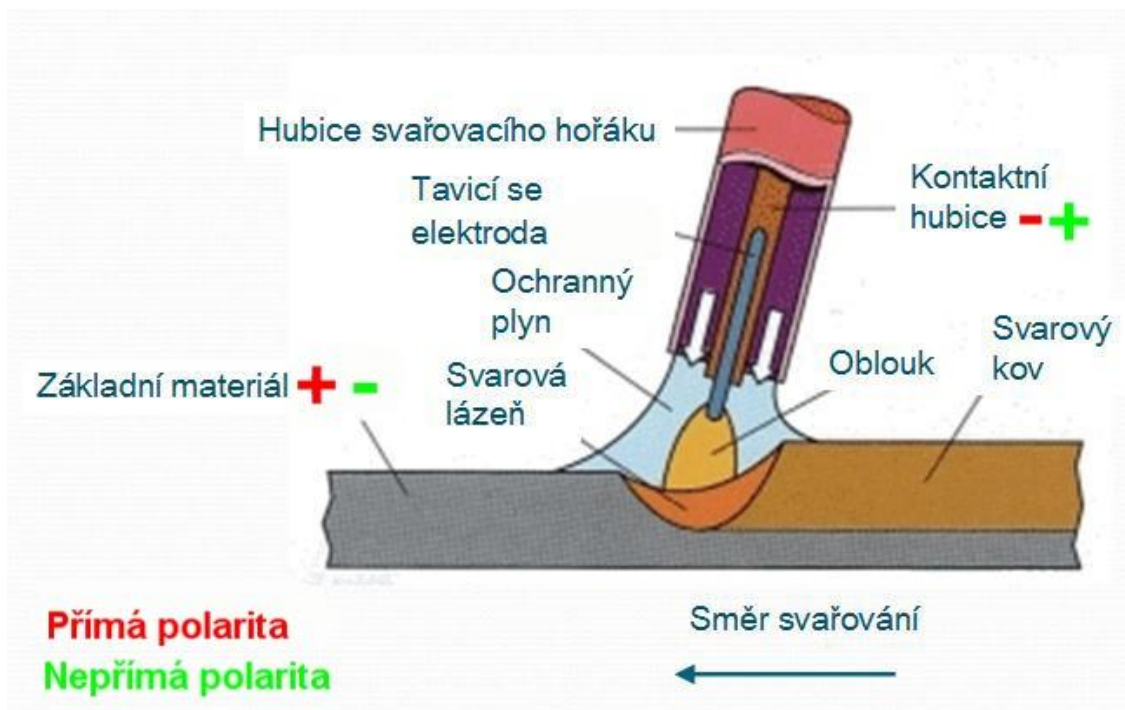
1.3 POPIS ČÁSTÍ MIG/MAG SVAŘOVACÍHO ZAŘÍZENÍ



Obr. 1 Základní schéma svařování metodou MIG/MAG [1]

Schéma zařízení (viz obr. 1) znázorňuje ruční (poloautomatické) svařování tzn., že svařování probíhá ručně, ale podávání drátu je mechanizované. Po stisknutí tlačítka na svařovacím hořáku (7) se uvede pomocí kladkového mechanismu (4) do chodu odvíjení drátu (elektrody) z cívky (3) nejčastěji o hmotnosti 15 kg. Zároveň dojde k vytvoření elektrického oblouku (1) mezi elektrodou (2) a základním materiálem, což má za následek vytvoření svarové lázně (12). Současně z hubice (11) začne proudit ochranný plyn (10), (argon, helium nebo oxid uhličitý), jenž je umístěn externě nejčastěji v tlakové láhvi. Součástí tlakových lahví bývají většinou i další pomocné prvky, jako jsou průtokoměr, redukční ventil a předešříváč plynu. Uvnitř hubice je kontaktní svařovací průvlak (9) neboli kontaktní špička, do které je přiveden třecím způsobem přes kladky proud ze zdroje svařovacího proudu (8) tak, aby se zajistilo co možná nejkratší délky drátu. Pomocí svařovacího zdroje dochází k regulaci napětí a proudu. Díky této regulační schopnosti zdroje měnit napětí a proud je možno ovlivnit výchozí kvalitu svaru. Hodnoty napětí a proudu jsou nastavovány dle svařovaného materiálu, velikosti jeho tloušťky a druhu přenosu kovu do svarové lázně. Novější typy svářeček již bývají vybaveny dálkovým ovládáním napětí a proudu, což zjednodušuje práci svářeče. U MIG/MAG svařování se v drtivé většině případů využívá stejnosměrného proudu. Napojení hořákového kabelu (6) je zajištěno pomocí rychloupínací spojky (5). Dle zapojení elektrody na zdroj svařovacího proudu rozlišujeme buď polaritu nepřímou, anebo polaritu přímou. Nepřímá polarita (viz obr. 2) zapojení je tehdy, když kladný (+) pól je na elektrodě a záporný (-) pól na základním materiálu. Toto zapojení se vyznačuje zvýšenou hloubkou závaru,

malým převýšením a širší housenkou. Vyskytuje se častěji, než přímá polarita zapojení, která je opakem tzn., že záporný (-) pól je na elektrodě a kladný (+) pól na základním materiálu. Zapojení přímé se vyznačuje menší hloubkou závaru, ale rostoucí šířkou a výškou svarové housenky. [1, 2]



Obr. 2 Princip metody MIG/MAG a zobrazení přímé a nepřímé polarity [6]



Obr. 3 Ukázka dílenské MAG svářečky

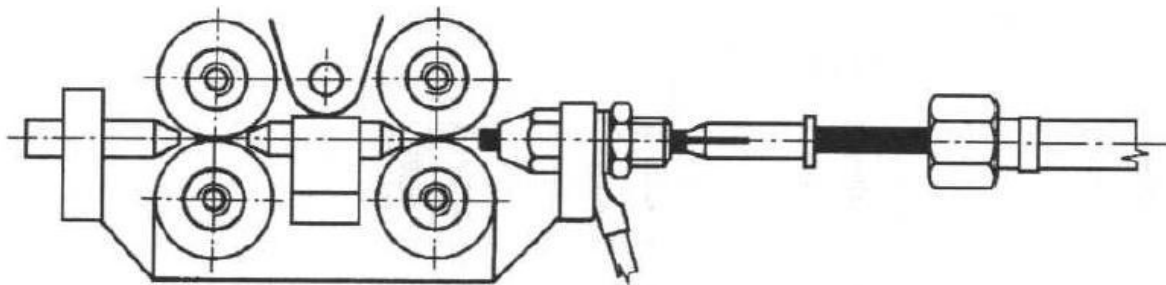
Ukázka profesionální dílenské MAG svářečky s deseti stupňovou regulací napětí (obr. 3). Ochranným plynem je CO_2 a přídavný materiál je navinut ve formě drátu na cívce. Tento svářecí stroj je vhodný pro kovovýrobu, údržbářské provozy, zámečnictví, karosářské nebo domácí práce. Mezi jeho přednosti patří vysoký výkon, spolehlivost a jednoduché ovládání.

1.4 MECHANISMY PODÁVÁNÍ DRÁTU

U MIG/MAG metody svařování je přídavný materiál ve formě drátu namotaného na cívce nepřetržitě podáván skrze hadici do svařovací hubice pomocí zařízení, jenž se nazývá podavač (obr. 4). Mechanismus podávání drátu je zajištěn systémem kladek. Mechanismy jsou buď jednokladkový, dvoukladkový, čtyřkladkový, anebo s mimoběžnými osami. Kladky jsou opatřeny různými typy drážek dle podávaného materiálu. Na kladkách bývá vyraženo číslo, pro jaký průměr drátu jsou určeny. Hlavní úlohou podavače je to, aby byl drát co nejplynuleji podáván bez deformací a poškození povrchu. Podavač bývá umístěn buď odděleně na odděleném vozíku, anebo je přímo zabudován na vozíku společně se zdrojem. [1, 4]

Podavač se obvykle skládá z těchto hlavních částí:

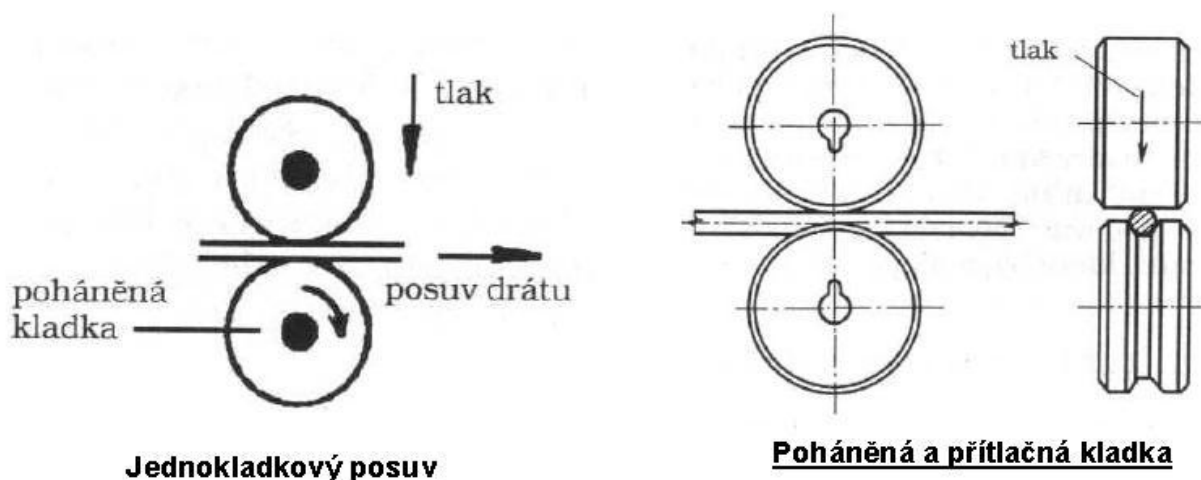
- podávací mechanismus s motorem a systémem kladek,
- cívka drátu,
- připojení k vedení do hořáku (rychloupínací spojka).



Obr. 4 Schéma podávacího zařízení (podavače) [4]

1.4.1 Jednokladkový posuv

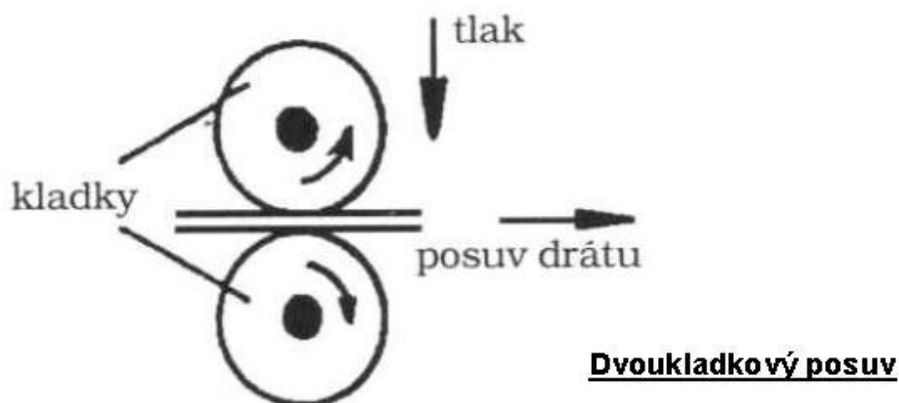
Při jednokladkovém posuvu (obr. 5) je poháněna pouze jedna klapka, která má drážku, kdežto druhá kladka drážku nemá a slouží pouze k udržování přitlaku. Výhodou je jednoduchost konstrukce a cena. Nevýhodami jsou silné deformace drátu, velký přitlak a jednobodový posuv drátu. [4]



Obr. 5 Schéma jednokladkového posuvu [4]

1.4.2 Dvoukladkový posuv

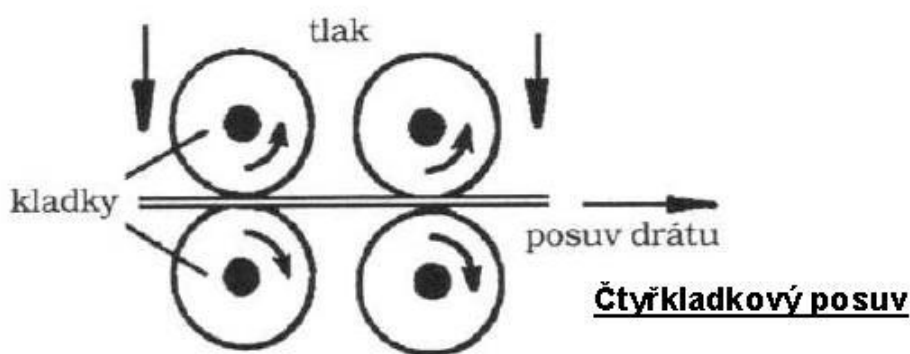
Při dvoukladkovém posuvu (obr. 6) jsou pohonem poháněny obě dvě kladky. Každá kladka je opatřena drážkou. Výhodou takovéto konstrukce posuvu je její jednoduchost a střední přítlak (menší než jednokladkový), proto deformace drátu není tak velká a je oboustranná. Nevýhodou může být nutnost zajištění stejné rychlosti rotace obou kladek. [4]



Obr. 6 Schéma dvoukladkového posuvu [4]

1.4.3 Čtyřkladkový posuv

U čtyřkladkového posuvu (obr. 7) má podávací zařízení pohon všech 4 kladek, přičemž každá kladka má drážku. S rostoucím množstvím poháněných kladek roste potřeba zajištění stejné rychlosti rotace pro všechny čtyři kladky. Tato dispozice zajišťuje nejmenší otěr drátu, zároveň není potřeba tak velkého přítlaku jako u dvoukladkové konstrukce. Výhodou je umožnění posuvu i měkčích přídavných materiálů. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena. [4]



Obr. 7 Schéma čtyřkladkového posuvu [8]

2. PŘÍDAVNÉ MATERIÁLY

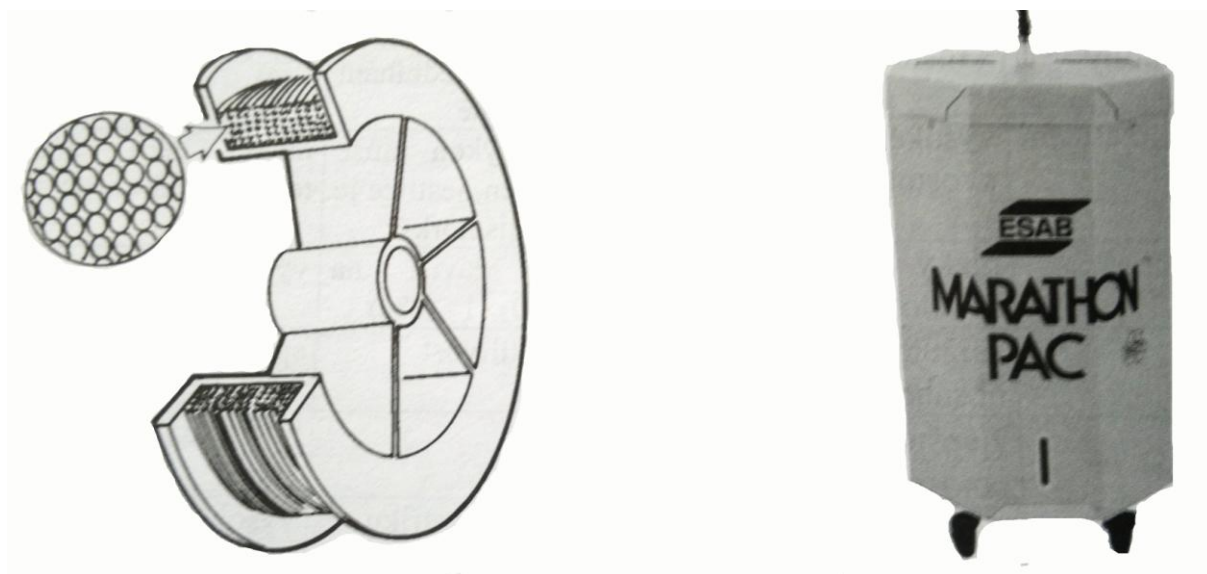
Jako přídatné materiály jsou pro svařovací metodu MIG/MAG používány:

- plný drát,
- plněný drát (trubičkový drát):
 - rutilový,
 - bazický,
 - s kovovým práškem.

Dráty bývají navinuty na plastových nebo drátěných cívkách nejčastěji o hmotnosti 15 kg. Rozměry a hmotnosti cívek jsou vyráběny v širokém sortimentu – 5, 6, 10, 12, 16, 18, 25, 30 kg. Pro robotizovaná pracoviště bývají také cívky dodávány i ve formě svitku baleném v lepenkovém paketu (obr. 8) o hmotnosti až 200 kg. Výhodou těchto paketů velkých hmotností je umožnění svařování robotem po dlouhou dobu bez toho, aby byla přerušena práce výměnou cívky. Každá cívka nebo svitek musí být opatřen štítkem obsahujícím následující údaje výrobce:

- označení výrobce,
- označení drátu dle výrobce i příslušné normy,
- průměr drátu,
- hmotnost,
- číslo tavby,
- klasifikace a certifikace u jiných orgánů

Plné dráty jsou vyráběny v průměrech: 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0 a 2,4 mm. Nejrozšířenější průměry jsou 0,8 až 1,6 mm. [1]



Obr. 8 Plastová cívka a balený lepenkový paket [1]

3. OCHRANNÉ PLYNY

Ochranný plyn je nedílnou součástí MIG/MAG svařovací metody. Volba ochranného plynu má vliv nejen na ochranu roztaveného konce elektrody, tekuté kapky kovu, svarovou lázeň a přilehlé oblasti od kontaminace okolní atmosférou, ale také výrazně ovlivňuje stabilitu hoření oblouku, způsob přenosu kovu přes oblouk, vytvoření svarové housenky a metalurgické reakce v oblouku. Přítomnost vzduchu způsobuje oxidaci a nitridaci svarového kovu, což má za následek výrazné zhoršení mechanických vlastností svarových spojů. V současné době rozeznáváme široký sortiment plynů a jejich směsí, které se skládají z argonu (Ar), hélia (He), kyslíku (O_2), oxidu uhličitého (CO_2), a dalších plynů. Používané technické plyny se liší chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Počet směsí se z technických a ekonomických důvodů snížil na tyto nejčastější používané plyny a jejich směsi: [1, 2]

- CO_2 ,
- Ar + CO_2 (až do 25% CO_2),
- Ar + CO (až do 3% CO),
- Ar + O_2 (až do 8% O_2),
- Ar + O_2 + CO_2 (až do 15% CO_2 , 5% O_2),
- 65% Ar + 26,5% He + 8% O_2 + 0,05% O_2 ,
- Ar + 8% CO_2 + 0,03 NO.

Účinek jednotlivých plynů na metalurgické procesy se velmi liší. Dle chemické aktivity můžeme plyny rozdělit do těchto skupin: [2]

- I – inertní (Ar, He, směs Ar + He),
- M – oxidační na bázi Ar, mírně, středně, silně (Ar + CO_2 , Ar + O_2),
- R – oxidační na bázi CO_2 (CO_2 , CO_2 + O_2),
- N – nereagující (N_2).

Ochranné plyny svým složením a množstvím ovlivňují různé svařovací charakteristiky, především tyto: [1]

- stabilita elektrického oblouku,
- způsob přenosu svarového kovu obloukem,
- hloubku a profil závaru,
- rychlost svařování,
- množství rozstříku.

Mezi neméně důležité fyzikální vlastnosti plynů také patří tepelná vodivost a entalpie. Důležité jsou především při teplotách mezi 2000 až 8000°C, kdy ovlivňují procesy ionizační a disociační energie. [2]

3.1 ARGON

Argon (Ar) je chemicky nereagující, nehořlavý, netoxický, bezbarvý a inertní plyn. Při svařování MIG/MAG se používá čistota plynu 99,95% (označení 3N5 a 3N8), respektive čistota 99,996%. Argon se vyznačuje dobrou tepelnou vodivostí, tudíž oblouk má potom vysokou teplotu. Použití čistého argonu je využíváno jen zřídka, častěji bývá kombinován ve směsi s jinými plyny. Pro svařování v argonové ochraně oblouku je zapotřebí menší množství energie (ionizační energie je 15,76 eV), aby se docílilo elektrické vodivosti plynu, což umožňuje zapálení a hoření oblouku i při nízkém napětí. Jeho hustota $1,784 \text{ kg.m}^{-3}$ způsobuje nízkou citlivost argonu na proudění okolního vzduchu, je 1,4x těžší než vzduch. V podmínkách svařovacího oblouku nastává větší záření a značné ztráty radiací doprovázené vznikem ozónu (O_3). V kontaktu s jinými plyny, dýmy a párami bývá ozón chemicky nestabilní, proto se do ochranného plynu argonu přidává ještě malé množství oxidu dusného (NO), který tvorbu ozónu snižuje. Čistý argon se využívá zřídka, častěji je ve formě směsi s jinými plyny a je použitelný pro všechny druhy svařitelných materiálů. [2]

3.2 HÉLIUM

Hélium (He) je také inertní plyn a je lehčí než vzduch. Hustota je $0,178 \text{ kg.m}^{-3}$. Používaná čistota plynu při svařování MIG/MAG je 99,996%. Oproti argonu má hélium nízkou atomovou hmotnost, důsledkem toho i nízkou hustotu plynu. Dosáhnutím ekvivalentní ochrany oblouku je zapotřebí zvýšit výtokovou rychlost plynu z hubice. Při 50% obsahu hélia v argonu musí být korekční faktor 1,35, při použití čistého héliového plynu musí být korekční faktor 3,16. Relativní výhodou hélia je vyšší ionizační energie (24,56 eV), což je nejvyšší oproti jiným používaným plynům. Vysoká hodnota ionizační energie s sebou přináší těžkosti při zapalování oblouku a stabilitě při jeho hoření, hlavně u dlouhého oblouku. Hélium ve směsi s jinými plyny způsobuje zvýšení rychlosti svařování. Tím, že směs Ar + He má vysokou tepelnou vodivost, je používána při svařování hliníku (Al), niklu (Ni), mědi (Cu) a jejich slitin. Použitím hélia ve směsi s argonem se zvýší hloubka závaru a také rychlost svařování. Čistý plyn hélia je vhodný pouze na MIG svařování mědi (Cu), kde je zapotřebí vysoké energie. Hélium je velmi drahý plyn. [2]

3.3 KYSLÍK

Kyslík (O_2) je nehořlavý plyn podporující oxidační hoření. Je těžší než vzduch s hustotou $1,429 \text{ kg.m}^{-3}$. Teplota varu je $-183 \text{ }^\circ\text{C}$ při působení atmosférického tlaku. Výroba kyslíku se provádí destilací zkapalněného atmosférického vzduchu. Kyslík (O_2) je ve směsi s argonem (Ar) používán v rozpětí obsahu 0,03 až 3%, ve směsi s argonem (Ar) a oxidem uhličitým (CO_2) nebo argonem (Ar) a héliem (He) v rozpětí obsahu 1 až 8%. Přídavek do 8% kyslíku (O_2) do argonu (Ar) se používá při svařování konstrukčních ocelí. Hlavním důvodem přidávání kyslíku (O_2) do ochranného plynu je to, že výrazným způsobem zvyšuje tekutost svarové lázně a povrchové napětí roztaveného kovu. Následkem toho se zlepši odplynění svarové lázně, profil svarové housenky a přechod kovu do základního materiálu. [1, 2]

3.4 OXID UHLIČITÝ

Oxid uhličitý (CO_2) je nehořlavý, nejedovatý a bezbarvý plyn bez chuti a zápachu. Teplota bodu varu dosahuje hodnoty $-78,45\text{ }^\circ\text{C}$ a hustota plynu činí $1,976\text{ kg.m}^{-3}$, tudíž je těžší než vzduch. Při koncentraci plynu 15% ve vzduchu hrozí udušení. Oxid uhličitý se vyznačuje vysokou tepelnou vodivostí a vysokým přenosem tepla do svarové lázně, což zajišťuje velmi dobré natavení svarových hran, hluboký průvar s profilem svarové housenky ve tvaru oválu a dobré odplynění svarové lázně. Na povrchu elektrody se vytvářejí kapky s velkým objemem, protože oxid uhličitý způsobuje vysoké povrchové napětí na roztaveném konci elektrody. Poloměr kapek mívá před oddělením často poloměr až 0,8 mm, což způsobuje rozstřík. Svar obsahuje velké množství oxidů, stejně jako množství strusky na povrchu. Povrch housenky se vyznačuje nerovnoměrností s větším převýšením a ostrým přechodem svarového kovu do okolního materiálu spolu se značným vrubovým účinkem. Nejčastěji se využívá oxidu uhličitého při MAG svařování, kde je vyžadována minimální čistota plynu 99,7%, rosný bod $-35\text{ }^\circ\text{C}$ a vlhkost maximálně 200 ppm. Svařování čistým oxidem uhličitým je výhodné zejména při svařování nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí, kde je používán zkratový přenos kovu a jsou využívány nižší proudy. Použití oxidu uhličitého se nedá použít při svařování sprchovým přenosem. Vliv oxidu uhličitého s některými vybranými plyny zobrazuje Tab. 1. [1, 2]

Tab. 1 Porovnání vlastností ochranných plynů [1]

Vlastnosti	Ar + CO_2	Ar + O_2	CO_2
Závar – Svar <ul style="list-style-type: none"> • poloha vodorovná shora • ostatní polohy 	dobrý spolehlivější s rostoucím % CO_2	dobrý může být kritický z důvodu předbíhání svarové lázně	dobrý spolehlivý
Tepelné zatížení hořáků	vysoké, snižuje se s rostoucím % CO_2	vysoké, výkon může být omezen, jestliže je hořák příliš horký	nízké díky dobré tepelné vodivosti
Stupeň oxidace	nízký, stoupá s rostoucím % CO_2	výrazně závisí na obsahu O_2 (1 – 8 %)	vysoký
Porozita	snižuje se s rostoucím obsahem CO_2	vysoká citlivost	spolehlivá
Přemostitelnost mezery	zlepšuje se s poklesem % CO_2	dobrá	horší než u směsných plynů
Tvorba rozstříku	stoupá s rostoucím % CO_2	téměř bez rozstříku	vysoká, stoupá s rostoucím výkonem
Vnášení tepla do svaru	stoupá s rostoucím % CO_2 , nižší rychlost ochlazování, menší nebezpečí vzniku trhlin	nejnižší vysoká rychlost ochlazování, nebezpečí vzniku trhlin větší	vysoké malá rychlost ochlazování, nebezpečí vzniku trhlin malé
Typ přenosu kovu obloukem	všechny typy	všechny typy	zkratový, kapkový

4. SÍLY PŮSOBÍCÍ NA KAPKU SVAROVÉHO KOVU

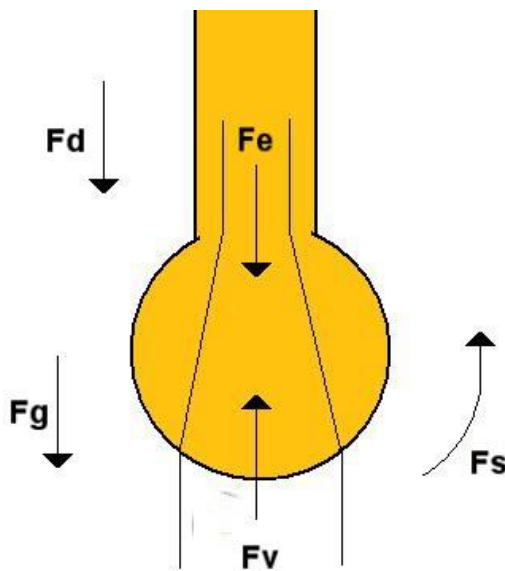
Při svařování metodami MIG a MAG dochází k tvorbě elektrického oblouku mezi elektrodou (přídavný materiál ve formě drátu na cívce) a základním materiálem (materiál, který je svařován). Při tomto procesu dochází k přenosu přídavného materiálu z odtaveného konce elektrody ve formě kapek, na které působí složitý systém silového působení, do svarového kovu. Na velikost, směr i výslednici sil kapek mají vliv charakteristiky, jakými jsou proudová hustota, polarita, průměr elektrody atd. Velikost, tvar a frekvence kapek je ovlivňována těmito faktory: [1]

- fyzikálními vlastnostmi roztaveného kovu (povrchové napětí, viskozita, teplota tavení a bod varu),
- technologickými parametry (proud, napětí a proudová hustota),
- vlastnostmi prostředí (teplota okolí, chemické interakce mezi plynem a elektrodou, tepelná vodivost plynu).

Při nižších proudech se tvoří na konci elektrody kapky větší s menší frekvencí oddělování a naopak při vyšších proudech je tendence tvorby menších kapek zato s vyšší frekvencí jejich oddělování od elektrody. Moment odtrhnutí kapky od elektrody je charakterizován statickou rovnováhou sil (obr. 9), která je popsána rovnicí (4.1). [1, 2]

$$F_g + F_d + F_e = F_v + F_s \quad [2] \quad (4.1)$$

Na levé straně rovnice jsou zastoupeny síly, jež mají silové působení na kapku ve směru jejího oddělení od konce elektrody a mají příznivý vliv na oddělení kapky, což jsou síla gravitační F_g , síla hydrodynamická F_d a síla elektromagnetická F_e . Na pravé straně rovnice jsou uvedeny síly, které působí proti oddělení kapky z elektrody, což jsou síla vyvolaná tlakem kovových par F_v a síla povrchového napětí F_s . Elektromagnetická síla a síla povrchového napětí mohou mít za určitých okolností opačný směr. [2]



Obr. 9 Statická rovnováha sil v momentě oddělení kapky [2]

4.1 GRAVITAČNÍ SÍLA

Gravitační síla napomáhá oddělení kapky od konce elektrody. Vliv gravitační síly je malý a ovlivňuje kapku pouze při svařování v polohách (v případě svařování nad hlavou nebo v případě svařování ze shora dolů) nebo pokud je prováděno svařování nízkými proudy, kdy je elektromagnetická síla malá. Gravitační síla je zjednodušeně vyjádřena rovnicí (4.1.1) [1, 2]

$$F_g = m \cdot g \quad [2] \quad (4.1.1)$$

kde: F_g [N] – gravitační síla,
 m [kg] – hmotnost kapky,
 g [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] – gravitační zrychlení.

Hmotnost kapky je vyjádřena rovnicí (4.1.2)

$$m = \rho \cdot V \quad [2] \quad (4.1.2)$$

kde: m [kg] – hmotnost kapky,
 ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] – hustota kapky,
 V [m^3] – objem kapky (koule).

Objem kapky je vyjádřen rovnicí (4.1.3)

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \quad [2] \quad (4.1.3)$$

kde: π [-] – Ludolfovo číslo (3,14159265),
 R [m] – poloměr kapky.

Po dosazení rovnice (4.1.3) do rovnice (4.1.2) a následně rovnice (4.1.2) do rovnice (4.1.1) vyjde konečný vztah pro vyjádření gravitační síly (4.1.4).

$$F_g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho \cdot g \quad [2] \quad (4.1.4)$$

4.2 HYDRODYNAMICKÁ SÍLA

Hydrodynamická síla nebo někdy také nazývaná síla způsobená tlakem proudícího ochranného plynu napomáhá oddělení kapky od nataveného konce elektrody a urychluje je směrem do tavné lázně. Tato síla je závislá na rychlosti proudění ochranného plynu, jeho složení a rozměru kapky. Hydrodynamická síla hraje důležitou roli při svařování sprchovým přenosem, kde napomáhá urychlování a oddělování kapek. Důležitou roli hraje v případě vysokých proudových hustot, kdy plasma proudí rychlostí až $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Hydrodynamickou sílu vyjadřuje rovnice (4.2.1) [1, 2]

$$F_d = 0,5 \cdot \pi \cdot v^2 \cdot \rho \cdot r_d^2 \cdot C_d \quad [2] \quad (4.2.1)$$

kde: F_d [N] – hydrodynamická síla

π [-] – Ludolfovo číslo (3,14159265),

v [m.s^{-1}] – rychlost proudění plynu,

ρ [kg.m^{-3}] – hustota plynu,

r_d [m] – poloměr kapky,

C_d [-] – koeficient zohledňující proudění plynu vyjádřený jako funkce Reynoldsova čísla R_e (4.2.2),

$$R_e = \frac{2 \cdot r_d \cdot \rho \cdot v}{\eta} \quad [2] \quad (4.2.2)$$

η [N.s.m^{-2}] – viskozita.

4.3 ELEKTROMAGNETICKÁ SÍLA

Elektromagnetická síla má také příznivý vliv na směr oddělování kapek od nataveného konce elektrody do základního materiálu. Tato síla má nejvýznamnější vliv při přenosu kovu v oblouku a to hlavně při svařování v polohách (nad hlavou, zespodu nahoru, atd.). Vzniká tak, že protékající proud elektrodou, obloukem a základním materiálem vytváří elektromagnetické pole, jehož důsledkem je působení tzv. Lorentzových sil, které působí jak v axiálním, tak radiálním směru. Při průchodu proudu se v místě tavení elektrody indukují magnetické pole, jehož důsledkem je vznik tlaku působícího kolmo na osu elektrody, čímž se snaží oddělit kapku od elektrody. Tento jev je nazýván jako Pinch-effect (stlačení sloupce plazmatu vlivem magnetického pole, jež v něm vzniklo při elektrickém výboji). Velikost tlaku je dána rovnicí (4.3.1) [1, 2]

$$p = \frac{I^2 \cdot (x^2 - r)}{100 \cdot \pi \cdot x^4} \quad [2] \quad (4.3.1)$$

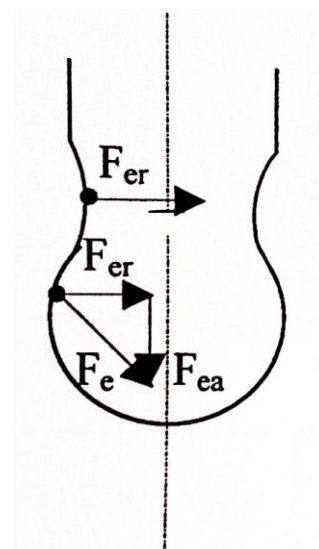
kde: p [dyn.cm^{-2}] – velikost tlaku,

I [A] – velikost proudu,

r [m] – poloměr vodiče (elektrody),

x [m] – vzdálenost od osy vodiče (elektrody).

V místě elektrody, kde dochází k zúžení, působí pouze elektromagnetická síla radiální F_{er} , jejíž směr je kolmý na osu elektrody, a axiální složka elektromagnetické síly F_{ea} má v místě zúžení hodnotu rovnu nule (obr. 10). [2]

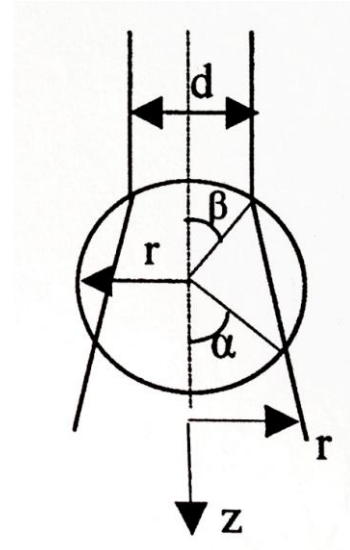


Obr. 10 Působení elektromagnetických sil [2]

Od místa zúžení směrem dále ke konci elektrody již průchod proudu kapkou nepůsobí rovnoběžně s osou elektrody, což umožňuje vzniku jak radiální elektromagnetické síly F_{er} , tak axiální elektromagnetické síly F_{ez} , která se podílí na přenosu kovu z elektrody do svarové lázně (obr. 11). [2]

Průměr anodové skvrny, což je oblast, kde dopadá elektrický oblouk na povrch svařovaného materiálu, není všeobecně stejný, jako průměr elektrody. Proud procházející kapkou se buď rozšiřuje anebo zužuje, potom elektromagnetická síla F_e (též Lorentzova síla) je dána vztahem (4.3.2) [2]

$$\vec{f}_e = \vec{J} \times \vec{B} \quad [2] \quad (4.3.2)$$



Obr. 11 Průchod proudu kapkou kovu

kde: \vec{J} – vektor proudové hustoty,

\vec{B} – vektor magnetické indukce, jenž je uplatňován v rámci celého objemu tekutého kovu.

Vyjádření radiální $(f_e)_r$ a axiální $(f_e)_z$ složky elektromagnetické síly F_e ve válcovém souřadném systému (r, φ, z) vypadá následovně (4.3.3) [2]

$$\begin{aligned} (f_e)_r &= -j_z \cdot B_\varphi \\ (f_e)_z &= +j_r \cdot B_\varphi \end{aligned} \quad [2] \quad (4.3.3)$$

V případě předpokladu, že kapka bude mít tvar koule (sférický) a proudová hustota bude stejnosměrně prostorově uložená, pak elektromagnetická síla působící na kapku je integrál hodnoty $(f_e)_z$ přes celý objem kapky a je vyjádřena vztahem (4.3.4) [2]

$$F_e = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{4 \cdot \pi} \cdot x(\alpha, \beta) \quad [2] \quad (4.3.4)$$

kde: F_e [N] – elektromagnetická síla,

μ_0 [$N \cdot A^{-2}$] – permeabilita vakua,

I [A] – elektrický proud,

π [-] – Ludolfovo číslo (3,14159265),

$$x(\alpha, \beta) = \log\left(\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}\right) - \frac{1}{4} + \frac{1}{1 - \cos \alpha} + \frac{2}{(1 - \cos \alpha)^2} \cdot \log\left(\frac{2}{1 + \cos \alpha}\right)$$

Význam úhlů α a β je znázorněn na obr. 11. V případě souladu průběhu toku proudu na obr. 11 lze axiální složku rovnice (4.3.4) zjednodušit do tvaru (4.3.5) [2]

$$F_e = \frac{\eta_0 \cdot I^2}{4 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{d_a}{d} \quad [2] \quad (4.3.5)$$

kde: μ_0 [$N \cdot A^{-2}$] – permeabilita vakua,

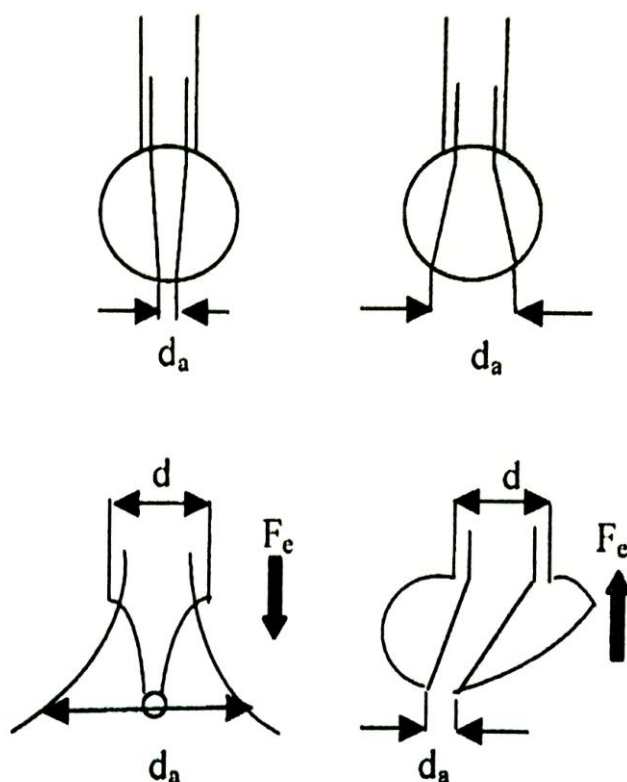
I [A] – elektrický proud,

π [-] – Ludolfovo číslo (3,14159265),

d_a [mm] – průměr obloukového sloupce, znázorněný na obr. 12,

d [mm] – průměr elektrody.

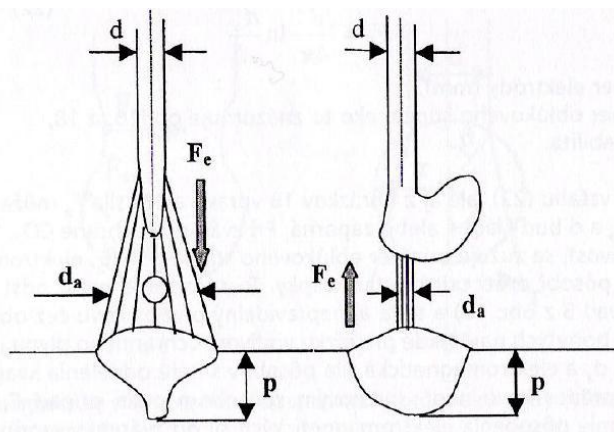
Ze vztahu (4.3.5) a z obrázku (obr. 12) vyplývá, že v závislosti poměru d_a/d buď kladná, anebo záporná. Při použití ochranné atmosféry oxidu uhličitého CO_2 , jenž je znám svou vysokou tepelnou vodivostí, dochází k zúžení průměru obloukového sloupce, tedy $d > d_a$, pak elektromagnetická síla F_e je negativní a působí proti odtrhnutí kapky (obr. 12 nahoře vlevo). To je typické pro nepravidelný kapkový přenos kovu skrz oblouk. Ve směsích bohatých na argon (Ar) je tomu přesně naopak, což je způsobeno nízkou tepelnou vodivostí argonu, kde se obloukový sloupec rozšiřuje, čili $d < d_a$ a elektromagnetická síla F_e působí ve směru oddělování kapky kovu do svarové lázně. Typickým představitelem takového stavu je sprchový přenos. [2]



Obr. 12 Možné směry působení elektromagnetické síly F_e [2]

Na obr. 13 je porovnání elektromagnetické síly za použití ochranného plynu argonu a oxidu uhličitého. Rychlost podávání elektrody – v , průměr elektrody – d a svařovací proud – I jsou stejné. [2]

Ar	CO_2
$d_a >$	d_a průměr sloupce
$p >$	p hloubka průvaru
$\lambda <$	λ tepelná vodivost



Obr. 13 F_e při použití Ar vlevo a CO_2 vpravo [2]

4.4 SÍLA VYVOLANÁ TLAKEM KOVOVÝCH PAR

Síla vyvolaná tlakem kovových par F_v má významný vliv pouze při svařování vysokými proudy, kdy působí proti oddělení kapky jako důsledek tlaku odpařujícího se kovu, jenž tryská z katodové nebo anodové skvrny. K tomuto tlaku je přičítán i tlak způsobený průnikem urychlených částic par do plazmatu oblouku, které unikají z kapky kovu. Velikost síly F_v se dá přibližně stanovit vztahem (4.4.1) [2]

$$F_v = \frac{m'}{\rho_v} \cdot I \quad [2] \quad (4.4.1)$$

kde: F_v [N] – síla vyvolaná tlakem kovových par,

m' [kg] – celková vypařovaná hmotnost par za sekundu a ampér,

ρ_v [kg.m⁻³] – hustota par,

I [A] – svařovací proud.

4.5 SÍLA POVRCHOVÉHO NAPĚTÍ

Síla povrchového napětí F_s vzniká důsledkem gradientu teplot a gradientu povrchových napětí vznikajících na tekutém povrchu kapky. Hraje významnou roli při oddělování kapky od konce elektrody a snaží se zaujmout tvar nejmenšího objemu, což je tvar kulový (koule). Příznivý vliv na povrchové napětí mají tzv. aktivní prvky obsažené v elektrodě, jakými jsou kyslík, selen, síra, ale také uhlík, hliník, dusík a fosfor. S klesající hodnotou proudu klesá i teplota a velikost povrchového napětí vzrůstá, současně narůstá i velikost kapky, jenž je schopná se ještě na elektrodě udržet a pohyb tekutého kovu směřuje z míst s teplotou nižší do míst s teplotou vyšší, což má za následek působení síly povrchového napětí F_s do svarové lázně napomáhající oddělení kapky. Naopak s rostoucím proudem dochází současně i ke zvýšení teploty, v jejímž důsledku slábne i vliv povrchového napětí, a pohyb tekutého kovu směřuje z míst s vyšší teplotou do míst s teplotou nižší, což má za následek působení sil od svarové lázně, čímž síla F_s působí proti oddělení kapky. Velikost síly povrchového napětí F_s pak udává vztah (4.5.1) [1, 2]

$$F_s = \frac{m \cdot g}{f\left(\frac{r}{a}\right)} \quad [2] \quad (4.5.1)$$

kde: $f\left(\frac{r}{a}\right)$ – funkce $f(r/a) = 1 - 0,4 \cdot \left(\frac{r}{a}\right)$,

m [kg] – hmotnost oddělené tekuté kapky,

g [m.s⁻²] – gravitační zrychlení,

r [m] – poloměr elektrody,

a – kapilární konstanta $= \left(\frac{2 \cdot \gamma}{\rho_m \cdot g} \right)^{\frac{1}{2}}$,

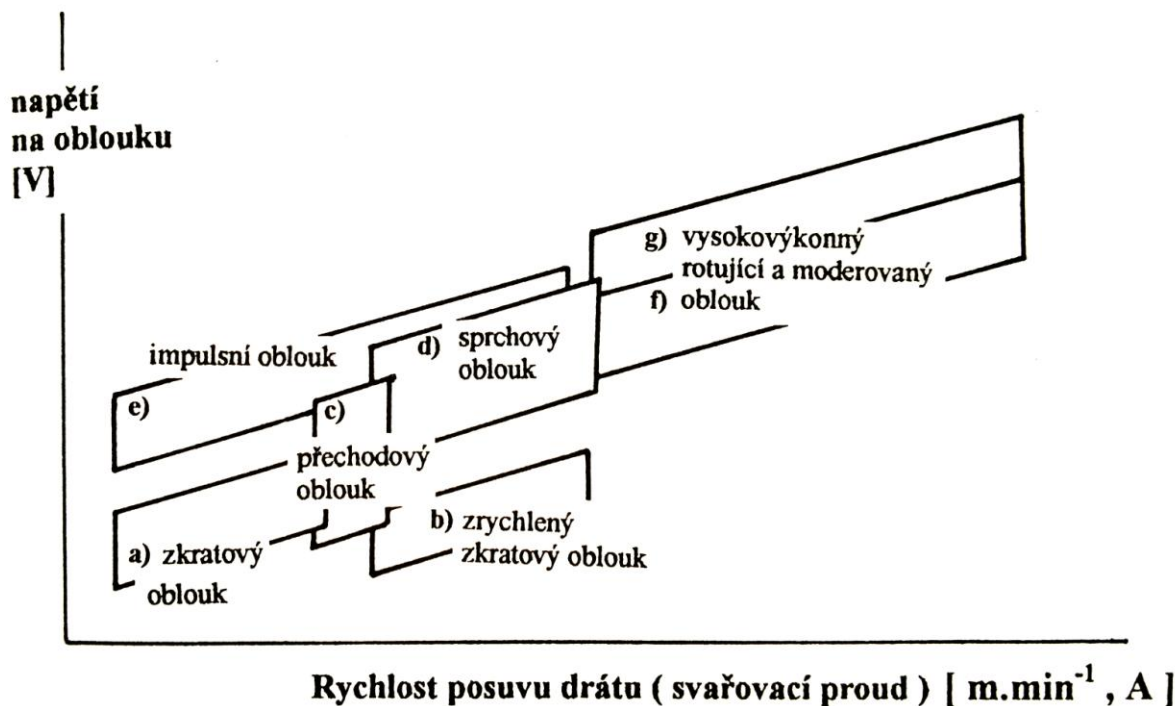
ρ_m [kg.m⁻³] – hustota tekuté kapky.

5. ZÁKLADNÍ TYPY PŘENOSU KOVU

Přenos kovu v oblouku je závislý na svařovacích parametrech, jakými jsou napětí a proud, ale ovlivňován je i zvoleným ochranným plynem, přídavným materiálem a jeho průměrem i volbou svařovací techniky. V podstatě se dá rozdělit přenos kovu v oblouku na tyto nejčastější typy: [1]

- zkratový
 - a) – zkratový přenos s krátkým obloukem,
 - b) – zrychlený přenos zkratový s krátkým obloukem,
- bezzkratový
 - c) – přechodový oblouk s nepravidelnými zkraty (kapkový),
 - d) – dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem,
 - e) – impulzní bezzkratový oblouk,
 - f) – moderovaný bezzkratový oblouk,
 - g) – dlouhý oblouk s rotujícím přenosem.

Pro lepší představivost o zařazení jednotlivých typů přenosů a jejich pracovních oblastí v závislosti na svařovacích parametrech napětí a proudu je uveden obr. 14.



Obr. 14 Zobrazení přibližných jednotlivých pracovních oblastí přenosů v závislosti na napětí a rychlosti podávání drátu (svařovacím proudem) [1]

Volbou vhodného typu přenosu kovu se dají ovlivnit výsledné mechanické vlastnosti svaru, jeho tvar a kvalita, stejně jako povrch svarové housenky, hloubka průvaru nebo stabilita hoření oblouku. [2]

5.1 ZKRATOVÝ PŘENOS

Pro zajištění stabilního procesu svařování platí pravidlo, že rychlost podávání přídatného materiálu (elektrody) musí být v rovnováze s rychlostí jejího odtavování. Není-li toto zajištěno a rychlost podávání elektrody převyšuje její odtavování, dochází k vytvoření zkratu mezi elektrodou a svařovaným materiálem, neboť dojde k ponoření elektrody do svařovací lázně, kde se po dobu zkratu oddělí kapka kovu. Tímto je zjednodušeně popsán zkratový přenos kovu obloukem při použití MIG/MAG metody svařování. Takovýto přenos může probíhat v široké škále svařovacích parametrů. Zkratového přenosu se dá dosáhnout, je-li sníženo napětí a rychlost odtavování. V případě velkých rozdílů mezi rychlostí podávání a rychlostí odtavování vznikají nestability. Fáze zkratového přenosu se rozdělují na fázi zkratu, která je charakterizována poklesem napětí, a fází hoření oblouku, jenž se vyznačuje poklesem jak proudu tak napětí. Na obr. 15 je fáze zkratu v oblasti I až III a VI, což je okamžik dotyku kapky z elektrody se svařovací lázní. V tomto okamžiku začne prudce narůstat proud, jehož okamžitá hodnota se spočte dle Tuthillova vztahu (5.1) [2]

$$I = \frac{U_{20}}{R_c} \cdot \left(1 - e^{\frac{-R_c \cdot t}{L_c}} \right) + I_0 \cdot e^{\frac{-R_c \cdot t_s}{L_c}} \quad [2] \quad (5.1)$$

kde: U_{20} [V] – napětí naprázdno,

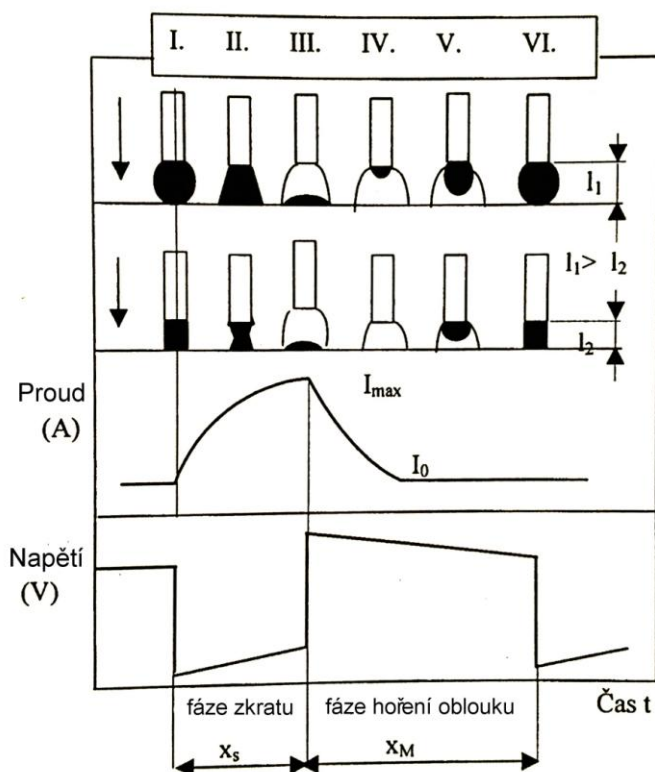
R_c [Ω] – celkový odpor svářecího obvodu,

t [s] – čas od začátku zkratu,

L_c [H] – celková indukčnost svářecího okruhu,

I_0 [A] – okamžitá hodnota proudu v čase $t = 0$.

Zkratový přenos se periodicky opakuje. Frekvence zkratů se snižuje za zvyšujícího se napětí a prodlužuje se fáze hoření oblouku. Při hodnotách 150 A a 25,5 V se již frekvence zkratů objevují ojediněle a nejedná se tedy již o přenos zkratový, nýbrž jde o přenos bezzkratový). [2]



Obr. 15 Schematické znázornění zkratového přenosu při větší a menší délce oblouku [2]

5.1.1 Zkratový přenos s krátkým obloukem

Tento typ zkratového přenosu je charakteristický pro hodnoty proudu od 60 do 180 A a napětí od 14 do 22 V. Svařovací výkon je schopen přenosu kovu od 1 do 3 kg.hod⁻¹. Je ověřeno, že při svařování nízkými proudy a vysokém napětí o hodnotách od 25 do 30 V dochází k velkému rozstříku a malé frekvenci oddělování kapek. Svařování drátem o průměru 1,2 mm při napětí okolo 27 V se frekvence kapek pohybuje okolo 5 kapek za sekundu. Při snížení napětí na hodnoty 14 – 18 V je již frekvence oddělování kapek od elektrody okolo 150 až 200 za sekundu. Proces svařování zkratem s krátkým obloukem úzce souvisí s délkou oblouku, kdy čím blíže je drát svarové lázni, tím rychleji se oddělují kapky a zamezuje se jejich růstu. Výhodou zkratového přenosu je pravidelné zhasínání oblouku, čímž se nevnáší tolik tepla do svařovaného materiálu a snižuje se tak tepelně ovlivněná oblast. Užití zkratového přenosu s krátkým obloukem je možno ve všech ochranných plynech a používá se především na svařování tenkých plechů, u tupých svarů na zavaření kořenových vrstev, svařování v polohách, svařování širších mezer a také pro svařování vysokolegovaných ocelí. [1]

5.1.2 Zrychlený přenos zkratový s krátkým obloukem

Podobá se spíše sprchovému přenosu a to kvůli parametrům rychlosti podávání drátu a proudu. Pro tento typ přenosu kovu je hodnota svařovacího výkonu 3 až 10 kg.hod⁻¹. Hodnoty napětí bývají v rozsahu od 14 do 25 V a svařovací proces probíhá pod velkým úhlem sklonu i ve velké vzdálenosti trysky od svařovaného materiálu, proto je nutné zvýšení průtoku plynu na 20 až 30 litrů za minutu. Vhodnost zrychleného zkratového přenosu je při svařování plechů tloušťky od 1 mm výše, pro kořenové svary i svařování v polohách. Jako ochranný plyn je používána nejčastěji směs Ar + 8% CO₂, která má malý rozstřík a nezpůsobuje ulpívání kapek na povrchu svařovaného materiálu, také vytváří dobrý profil svaru. [1]

5.2 BEZZKRATOVÝ PŘENOS

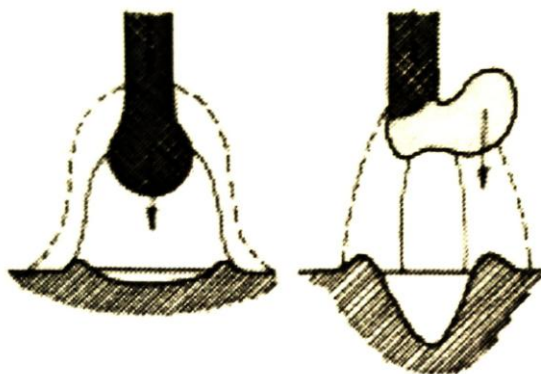
Bezzkratový přenos má více modifikací, mezi něž patří kapkový přenos, sprchový přenos, impulzní přenos, rotační přenos a moderovaný přenos. Přechod mezi kapkovým a sprchovým přenosem v ochranném plynu obsahujícím argon je dán tzv. tranzitním proudem, který se pro různé směsi plynů a různé průměry elektrod mění. Dalo by se říci, že se zvětšujícím se průměrem elektrody a rostoucím procentem obsahu oxidu uhličitého CO₂ ve směsi tranzitní proud narůstá, což je znázorněno v tabulce (Tab. 2). [2]

Tab. 2 Hodnoty tranzitního proudu pro různé ochranné směsi a průměry elektrody [2]

Průměr elektrody (mm)	Ar + 5% CO ₂ (A)	Ar + 15% CO ₂ (A)	Ar + 20% CO ₂ (A)
0,8	140	155	160
1,0	180	200	200
1,2	240	260	275
1,6	280	280	280

5.2.1 Přechodový dlouhý oblouk s nepravidelnými zkraty

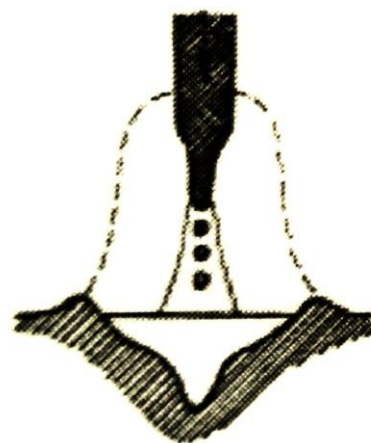
Přechodový dlouhý oblouk s nepravidelnými zkraty neboli jinak nazýván kapkový přenos vzniká při vyšších hodnotách napětí, většinou v rozmezí od 22 do 28 V. Hodnoty proudu se pohybují mezi 190 až 300 A. Pokud je svařováno nízkými hodnotami proudu, pak se kapky zpravidla oddělují jen pomocí gravitační síly F_g , která převyšuje velikost elektromagnetické síly F_e a velikost síly povrchového napětí F_s . Kapky mívají před oddělením průměr větší, než je průměr elektrody. S rostoucími hodnotami proudu se velikost kapek zmenšuje a zrychluje se frekvence oddělení od elektrody. Síla vyvolaná tlakem kovových par F_v způsobuje občasné vydutí kapky mimo osu elektrody (obr. 16). Rychlost vymrštění kapky do svarové lázně je vysoká, s frekvencí oddělování mezi 5 až 40 kapkami za sekundu. Projevy kapkového přenosu se dají výrazněji pozorovat při svařování v ochranném plynu CO_2 , charakteristický svým velkým povrchovým napětím, kde občasné nepravidelné zkraty a mimové vydutí kapky způsobují poměrně velký rozstřík kovu po svařovaném materiálu. Kapkový přenos bývá využíván při svařování středních tloušťek, ale kvůli častému rozstříku je použití tohoto přenosu spíše na ústupu. [1, 2]



Obr. 16 Kapkový přenos při působení síly vyvolané tlakem kovových par kolmo (vlevo) a mimoosově (vpravo) [2]

5.2.2 Dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem

Sprchový přenos je využíván při hodnotách proudu od 200 do 500 A při napětí mezi 28 až 40 V. Směsi používané u sprchového přenosu jsou $\text{Ar} + \text{CO}_2$, čistý argon pro svařování neželezných kovů, případně $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$. Charakteristické pro směsi plynů s argonem u sprchového přenosu je to, že díky snadné ionizaci plynu plazma obklopuje i konec elektrody, čímž dochází rychleji k ohřevu drátu a k tvorbě špičatého hrotu na konci elektrody, velikost kapek je malá a oddělují se s větší frekvencí (obr. 17). Při vysokých proudech dobře prohřátý materiál při sprchovém přenosu tvoří hluboké závary lineárně narůstající tak, jak narůstá hodnota proudu. U svařování v ochranném plynu CO_2 je tento typ přenosu nerealizovatelný důsledkem vysokých hodnot povrchového napětí, které neumožňuje vzniku drobných kapek. Průběh proudu je konstantní, pouze v krátkém okamžiku přerušení můstku dochází k jeho navýšení, což má za následek neustálé hoření oblouku a tím i přenos velkého množství tepla do svařovaného materiálu. [1]



Obr. 17 Sprchový přenos [1]

Sprchový přenos má klidné hoření oblouku a akusticky se jeví syčením přerušené občasným prasknutím. Svařovací výkon se pohybuje v rozmezí od 3 do 12 kg.hod⁻¹. Housenka má hladký a čistý povrch plynule přecházející do svařovaného materiálu vyznačující se minimálním rozstříkem. Využitelnost sprchového přenosu je při vyplňování housenek středních a velkých tloušťek. Jelikož při svařování sprchovým přenosem vzniká poměrně rozměrná koupel, hodí se pouze pro svařování ve vodorovné poloze, výjimečně i v jiných polohách. V tabulce (tab. 3) jsou uvedeny doporučené parametry pro sprchový přenos. [1]

Tab. 3 Doporučené parametry pro sprchový přenos v závislosti na průměru drátu [1]

Průměr drátu (mm)	Rychlost posuvu drátu (m.min ⁻¹)	Svařovací proud (A)	Svařovací napětí (V)
0,8	11	180	26
1,0	10	220	28
1,2	8	280	30

5.2.3 Impulzní bezzkratový oblouk

Jedná se o zvláštní formu bezzkratového přenosu kovu, neboť pracovní oblast impulzního bezzkratového přenosu se překrývá jak s kapkovým, tak se zkratovým přenosem (obr. 14). Je to v podstatě řízený přenos kovu po dobu jednoho impulzu, který se pravidelně opakuje v závislosti na frekvenci amplitudy impulzního proudu. Oblouk je udržován při nízkém základním proudu od 20 do 50 A, aby docházelo k udržení ionizace sloupce oblouku a průchodu proudu v něm proudící. Při zvýšení proudu na nadkritickou hranici dochází k přenosu kovu do svarové lázně. Proud impulzu a jeho trvání řídí oddělení kapky. Poté, co se kapka oddělí od elektrody, už není dále nutné udržovat proud v nadkritických hodnotách a přechází se znovu na hranici základního udržovacího proudu po dobu letu kapky obloukem až do její ponoření do svarové lázně (obr. 19). Celý proces se opakuje v cyklech. Parametry impulzu udává vztah (5.2.3.1) [1, 2]

$$I_p^n \cdot t_p = D \quad [2] \quad (5.2.3.1)$$

kde: I_p [A] – proud impulzu,

t_p [ms] – čas impulzu,

D [-] – konstanta oddělení kapky.

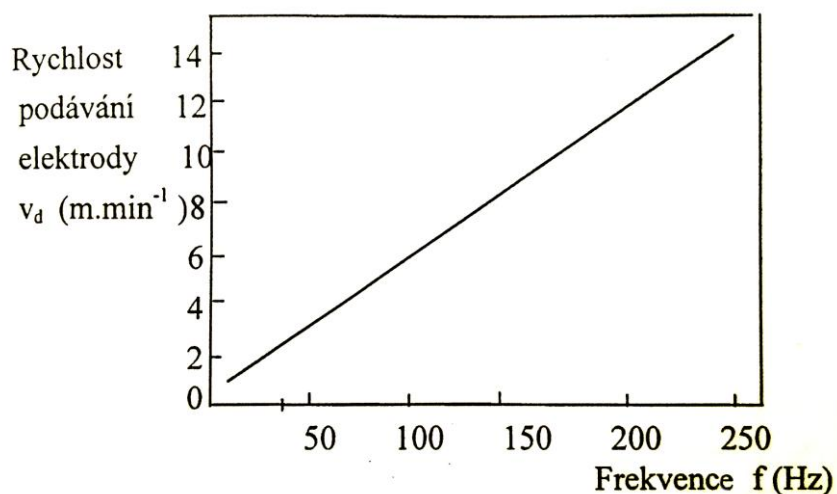
Pokud je správně nastavena kombinace proudu impulzu a délka jeho trvání, dosáhne se oddělení stejné kapky přídavného materiálu při každém impulzu. Pro zajištění stabilního hoření oblouku musí být zajištěno, že rychlost podávání elektrody v_d je stejná jako rychlost jejího tavení v_m . Délka elektrody l , která vytvoří kapku daného průměru, musí být konstantní a při frekvenci impulzů f se stanoví (5.2.3.2) [2]

$$v_d = f \cdot l \quad [2] \quad (5.2.3.2)$$

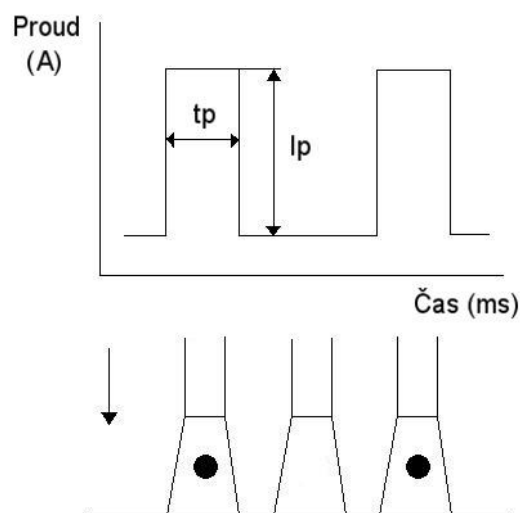
kde: f [Hz] – frekvence impulzů,

l [m] – délka elektrody, která po odtavení vytvoří jednu kapku.

Délku elektrody l , která po odtavení vytvoří jednu kapku, můžeme stanovit také z diagramu závislosti rychlosti podávání elektrody v_d na frekvenci impulzů f z obr. 18. [2]



Obr. 18 Závislost rychlosti podávání elektrody v_d na frekvenci f [2]



Obr. 19 Zobrazení přenosu kapky kovu po dobu jednoho impulzu při pravoúhlém zobrazení [2]

Závislostí frekvence impulzů na proudu je udržována konstantní velikost kapky. Pro nízký svařovací proud musí být velikost frekvence také na nízkých hodnotách a naopak při vysokých proudech musí být frekvence vysoká. Nastavení šířky impulzu a frekvence nelze nastavit libovolně, ale pro stanovení platí vztah (5.2.3.3) [1]

$$f = \frac{1}{T_p} \quad [1] \quad (5.2.3.3)$$

kde: f [Hz] – frekvence,

T_p [s] – doba trvání impulzu.

Obecně se hodnoty šířky impulzu pohybují od 0,2 do 5 ms a hodnoty frekvence impulzů mezi 25 – 500 Hz (1kHz). Zavedení elektronicky řízených zdrojů proudu umožňuje u impulzního přenosu kovu realizaci tzv. jednotlačítkového řízení, což znamená, že obsluha nastaví pouze jeden parametr svařování, ku příkladu rychlost podávání elektrody, a řídicí systém zdroje dle tohoto parametru nastaví hodnoty napětí a proudu. V současnosti obsluha zadá střední hodnotu proudu a dle ní se automaticky vypočítá a nastaví rychlost podávání elektrody a ostatní parametry pulzace proudu. Výhodou takto synergicky řízeného svařovacího procesu je předem naprogramované zařízení výrobcem, což ulehčuje operátorovi svařovacího zařízení řízení. Operátor nastavuje pouze volbu ochranného plynu, průměr elektrody a svařovaný materiál. [1, 2]

Mezi výhody impulzního přenosu patří svařování tenkých plechů, svařování v polohách, vysoké hodnoty proudu taví i velké průměry přídavného drátu, jemný povrch svaru i v jeho kořeni, vhodnost metody impulzního přenosu ke svařování hliníku i hliníkových slitin a vysokolegovaných ocelí, široké aplikační možnosti díky nastavení svařovacích parametrů. Svařovací výkon impulzního přenosu se nachází v rozmezí 2 až 5 kg.hod⁻¹. Volba ochranných plynů se volí pro uhlíkové oceli směs Ar + 8% CO₂, pro nerez oceli Ar + 2% O₂, pro svařování hliníku čistý Ar. [1]

5.2.4 Moderovaný bezzkratový přenos

Tohoto typu přenosu kovu se dosáhne, je-li svařováno vysokými hodnotami proudu 450 – 750 A a napětí 40 – 50 V. Současně při tak velkých parametrech musí být i vysoká rychlost podávání elektrody 20 – 45 m.min⁻¹ a průtok ochranného plynu 8% směsí argonu v rozmezí 18 – 25 l.min⁻¹. Svařovací výkon dosahuje hodnot až 25 kg.hod⁻¹. Svar má hluboký a úzký tvar, což umožňuje svařování velkých tloušťek. [1]

5.2.5 Dlouhý oblouk s rotujícím přenosem

Svařovací parametry jsou téměř shodné jako u moderovaného přenosu, pouze napětí je vyšší 65 V a délka výletu drátu je nad 20 mm. Rotující oblouk lze také dosáhnout rotací svařovací hubice. Elektroda je vlivem vysokého proudu a délce výletu odporovým teplem zahřátá téměř na teplotu tavení a vlivem působení magnetického pole je plastický konec drátu roztáčen, což způsobí kuželovou plochu svaru. Vytváří se tak svar, který má hluboký a široký závar ve tvaru misky a který má příznivý přechod na okrajích svaru. [1]

6. ZÁVISLOST NAPĚTÍ A PROUDU (U, I) NA TYP PŘENOSU KOVU

6.1 OBECNÝ VLIV SVAŘOVACÍHO NAPĚTÍ

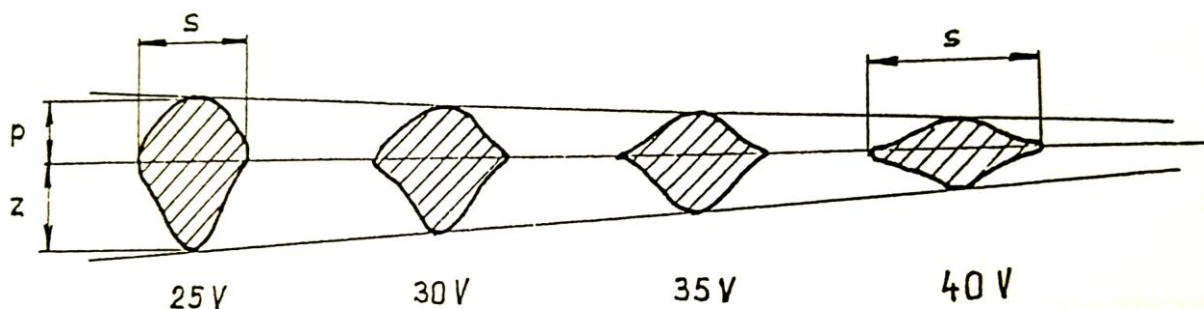
Svařovací napětí je udáváno jako potenciální (polohový) rozdíl mezi elektrodou a svařovaným materiálem. Hodnota napětí se mění s velikostí délky oblouku, ale na výkon odtavení elektrody je vliv svařovacího napětí malý stejně jako na hloubku závaru. Velký vliv má velikost svařovacího napětí na šířku svarové housenky. U svařování ochranným plynem CO_2 se oproti jiným směsným plynům nastavuje hodnota napětí o 2 až 3 V vyšší. Obecně se dá vypočítat nastavení hodnoty napětí dle vztahu (6.1.1.1) [1]

$$U = 15 + 0,035 \cdot I_s \quad [1] \quad (6.1.1.1)$$

kde: U [V] – hodnota pracovního napětí,

I_s [A] – svařovací proud.

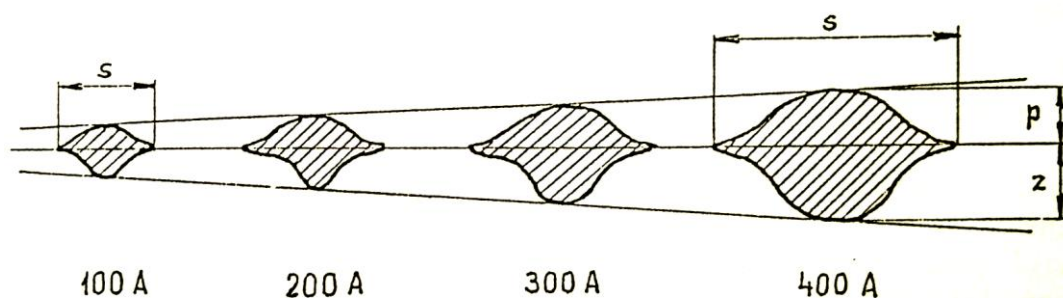
Nastavováním napětí dochází k ustavení pracovního bodu a tím i k regulaci optimální délky oblouku i jeho stability. To je prováděno pouze v určitém rozmezí pracovní oblasti. Mezi dalším působením vlivu napětí jsou kontrakční účinky oblouku, které mohou ovlivnit tvar a rozměry oblouku. Působení účinků s narůstající hodnotou napětí zobrazuje obr. 20, kde p – převýšení, z – hloubka závaru a s – šířka svarové housenky. Příliš vysoké napětí působí na prodloužení délky oblouku, propal prvků, náchylnost svarů na vznik pórovitosti i zvýšeném rozstříku. S vysokým napětím se podotýkají i problémy s příliš širokou a mělkou lázní a také nebezpečí předbíhání svarové lázně před oblouk. Naopak příliš nízké napětí způsobuje nestabilitu procesu svařování, vznik úzkých svarových housenek s větším převýšením při svařování velkými rychlostmi a také nedostatečné natavení hran svaru, což vede ke vzniku studených spojů. [1]



Obr. 20 Působení velikosti napětí na tvar svaru [1]

6.2 OBECNÝ VLIV SVAŘOVACÍHO PROUDU

Svařovací proud hraje důležitou roli při přenosu svarového kovu skrze oblouk a také na tvar průřezu svarové housenky. S rostoucí hodnotou narůstá velikost a tekutost svarové lázně, součinitel roztavení, odtavovací výkon a proudová hustota. Proudová hustota [$\text{A} \cdot \text{mm}^{-2}$] roste se zmenšujícím se průměrem přídavného materiálu (elektrody). Vlivem zvýšení velikosti proudové hustoty dochází podobně jako u svařovacího proudu k nárůstu hloubky závaru a zvýšení odtavovacího výkonu. Při zachování konstantní velikosti napětí a zvýšením proudu se výrazně rozšiřuje hloubka závaru s malým nárůstem šířky a výšky převýšení svarové housenky (obr. 21), kde s – šířka svarové housenky, p – převýšení a z – hloubka závaru. [1]



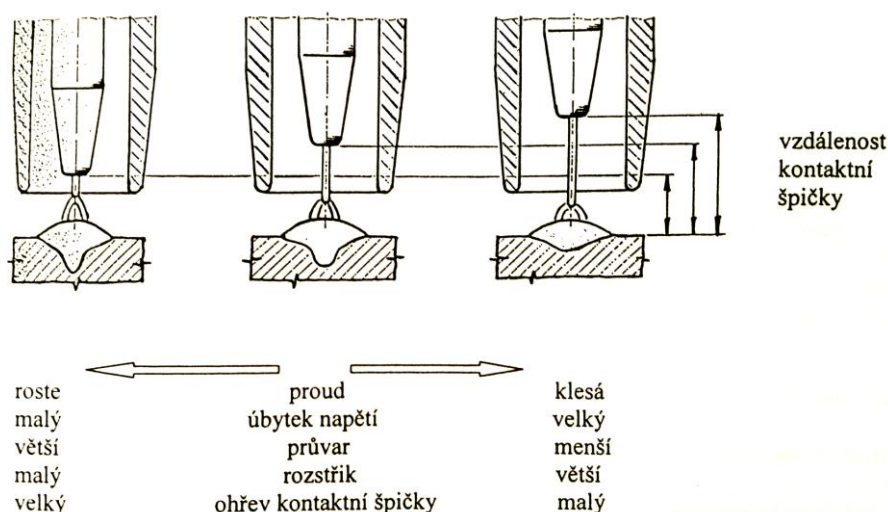
Obr. 21 Působení velikosti proudu na tvar svaru [1]

Velikost proudu se před samotným zahájením svařování nastavuje buď dle zkušeností, anebo dle údajů z tabulky (tab. 4). Je-li požadavek na kvalitu svaru, pak je volen menší průměr drátu, protože jím prochází větší proudová hustota a tím dochází k tvorbě malých kapek. Je-li požadavek zajištění ekonomického hlediska z důvodu snížení počtu svařovacích tahů nebo směrové stability výletu drátu, je vhodnější volba drátu většího průměru. Toho se dá využít u impulzního svařování, kde samotná velikost kapek je řízena vlastním procesem svařování. Nejčastější vady způsobené proudem nebo napětím popisuje tabulka (tab. 5). [1]

Tab. 4 Orientační hodnoty parametrů svařování pro MAG metodu svařování oceli [1]

Typ svaru	Tloušťka plechu	Průměr elektrody	Výkon natavení	Rychlost posuvu drátu	Svařovací proud	Rychlost svařování
	[mm]	[mm]	[kg.hod ⁻¹]	[m.min ⁻¹]	[A]	[cm.min ⁻¹]
I svar	1	0,6	1,0	7,0	60	83
	1,5	0,8	1,2	6,0	90	80
	2	0,8	1,5	6,8	110	83
	3	0,8	1,8	8,0	125	55
	3	1,0	2,1	6,0	150	63
V svar	4	1,0	2,2	6,4	160	40
	5	1,0	2,2	6,4	160	28
	6	1,0	2,1 / 2,9	6,8 / 8,5	150 / 200	60 / 43
	8	1,0 / 1,2	2,1 / 3,9	6,0 / 7,6	150 / 260	43 / 28
	10	1,0 / 1,2	2,1 / 5,1	6,0 / 10,0	150 / 320	35 / 21
Koutový svar	2	0,6	1,2	8,4	70	40
	2	0,8	1,6	6,8	110	53
	3	0,8	1,9	8,3	130	32
	3	1,0	2,4	7,0	170	40
	4	1,0	2,7	8,2	190	28
	5	1,2	3,9	7,8	260	26
	6	1,2	3,9	7,8	260	20
	6	1,2	4,8	9,5	300	22
	8	1,2	4,8	9,5	300	14

S narůstajícím svařovacím proudem roste frekvence průchodu kapek a klesá jejich objem (zejména u běžných typů přenosů), dochází ke změně intenzity sil působících na kapku. Svařovací parametry (proud a napětí) jsou ovlivňovány také vzdáleností kontaktní špičky ve svarové hubici od svařovaného materiálu. Jednotlivé změny zobrazuje obr. 22. Významná je především změna proudu, jehož velikost se zmenšuje se vzrůstající hodnotou vzdálenosti špičky od základního materiálu, a tím dochází ke snížení hloubky průvaru. Na 1 mm změny výběhu elektrody připadá celková změna intenzity proudu mezi 10 až 20 A. [1]



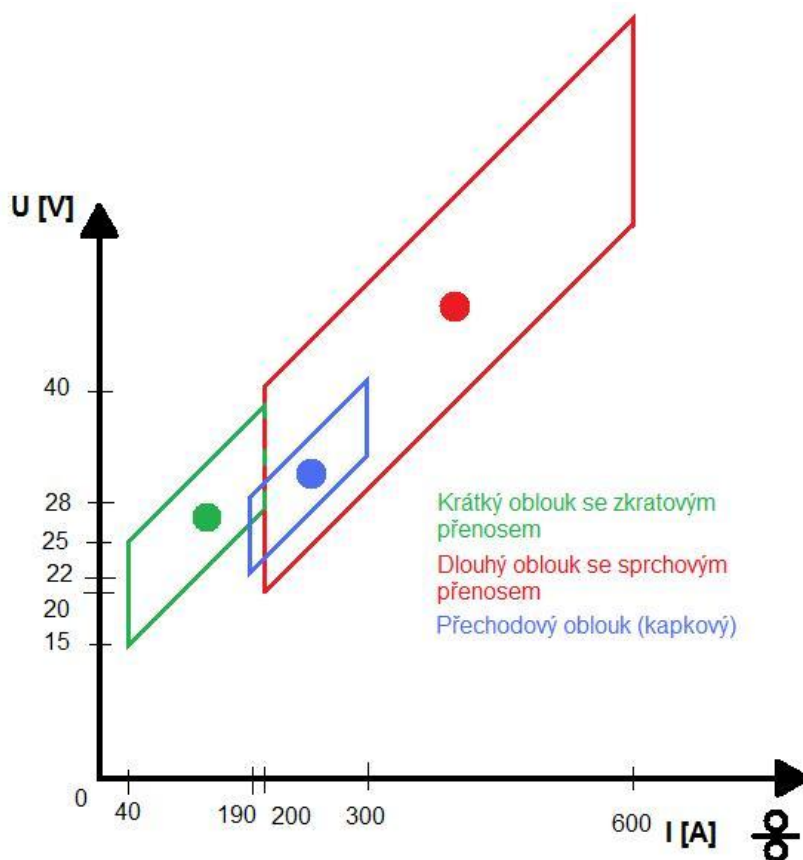
Obr. 22 Důsledky změny vzdálenosti kontaktní špičky od základního materiálu [1]

Tab. 5 Nejčastější vady a jejich příčiny [1]

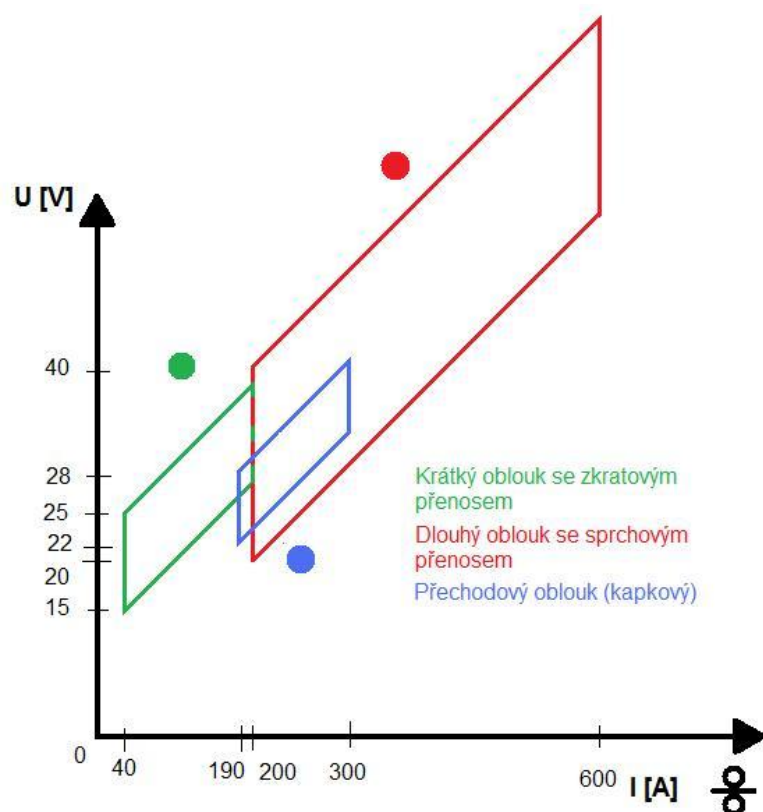
NAZEV VADY	PRÍČINA VADY
Trhlíny za horka Trhlíny za studena	Výskyt ve spodních vrstvách vícevrstvých svarů u ocelí s obsahem uhlíku kolem 0,3 %, vysoká rychlost svařování, rychlé ochlazování – nesprávný předeřev, nízké napětí a vysoký proud, vysoký obsah síry v oceli, nevhodný profil svaru, přídavný materiál u vysokolegovaných ocelí.
Pórovitost na povrchu Pórovitost vnitřní	Nedostatečná plynová ochrana – průvan, náklon hořáku, vysoké napětí, znečištěný povrch elektrody, voda z chlazení hořáku. Znečištěné svarové plochy, vlhkost na materiálu, široká svarová mezera, rezavý povrch elektrody, rychlé kývání hořáku, nevhodný ochranný plyn, vysoký průtok plynu.
Nekovové vměstky	U vícevrstvých svarů – neočištěná, nepřetavená struska mezi housenkami.
Převýšený svar	Nízké napětí, špatné vedení hořáku, vysoká rychlost svařování.
Zápaly a vruby	Vysoké napětí, špatné vedení hořáku, vysoký svařovací proud, vysoká rychlost svařování.
Nedostatečný průvar	Nízký svařovací proud, malá kořenová mezera, vysoké otupení svarové plochy, spoj ve špatné vzájemné poloze.
Nadměrný rozstřík	Nedostatečná indukčnost, malá nebo naopak velká délka oblouku, nízké nebo vysoké napětí.
Uzký svar	Nízké napětí a vysoká rychlost, přímé vedení hořáku bez rozkyvu.

6.3 VLIV (U , I) NA TYP PŘENOSU KOVU

Pracovní oblast (obr. 23) je vymezena volbou ochranného plynu. Při použití ochranného plynu oxidu uhličitého a jeho směsí jsou hodnoty vymezující pracovní oblast pro zkratový přenos s krátkým obloukem pro napětí 15 – 25 V a pro proud mezi 40 až 200 A. Při správně nastavených hodnotách svařovacího proudu a napětí je umístěn pracovní bod uprostřed pracovní oblasti. U zkratového přenosu s krátkým obloukem dochází při splnění této podmínky ke klidnému hoření oblouku vyznačující se praskavým zvukem. Při zvýšení napětí a zachování stejné hodnoty proudu se dostane pracovní bod mimo pracovní oblast (obr. 24) a dojde k nestabilitě oblouku, jež má za následek zvýšení rozstříku. Při současném zvýšení hodnot proudu a napětí se dostane pracovní bod do oblasti dlouhého oblouku se sprchovým přenosem. Ten se vyznačuje stabilitou a vysokou produktivitou. Při správném nastavení je slyšet šumivý nebo syčivý zvuk. Pracovní oblast pro dlouhý oblouk se sprchovým přenosem má hodnoty pro napětí 20 – 40 V a pro proud 200 – 600 A. Na rozmezí pracovní oblasti zkratového přenosu a sprchového přenosu leží tzv. přechodový oblouk (neboli kapkový), který je velmi nestabilní a způsobuje velký rozstřík. Hodnoty jeho napětí leží v rozmezí od 22 do 28 V a hodnoty proudu se pohybují mezi 190 až 300 A. [3]



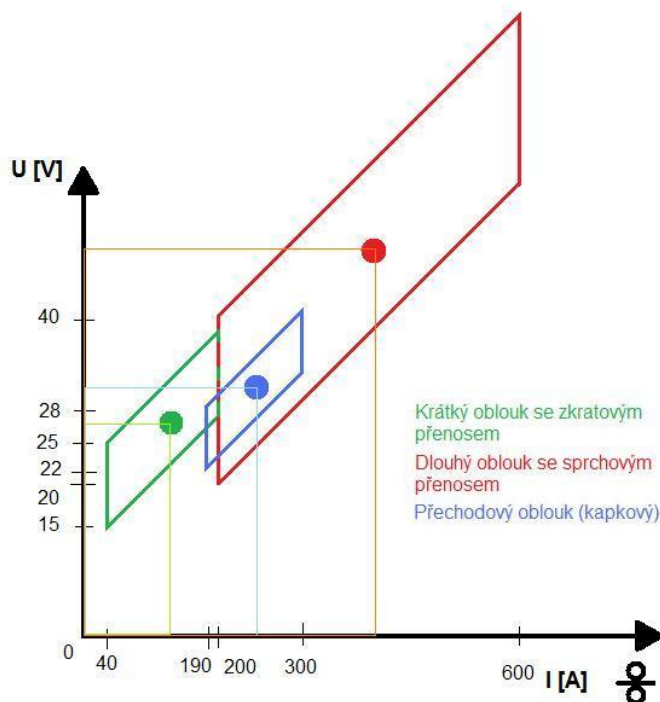
Obr. 23 Zobrazení správně nastavených pracovních bodů v jednotlivých pracovních oblastech [3]



Obr. 24 Zobrazení polohy pracovních bodů mimo pracovní oblasti [3]

6.4 VLIV (U , I) NA HODNOTU VNESENÉHO TEPLA DO OBLOUKU

Hodnota vneseného tepla se spočítá jako plocha obdélníku, která je dána součinem hodnoty napětí a proudu (obr. 25). S rostoucími hodnotami napětí a proudu dochází ke zvýšení vneseného tepla do oblouku, proto u sprchového přenosu s vysokými hodnotami napětí a proudu bude hodnota tepelné energie vnesené do oblouku vyšší, než u zkratového přenosu. Je-li požadována menší hodnota vneseného tepla do oblouku než u sprchového přenosu, pak se volí impulzní přenos, jehož tepelná energie je menší, protože hodnoty proudu a napětí jsou nižší. [3]



Obr. 25 Zobrazení vnesené tepelné energie do oblouku [3]

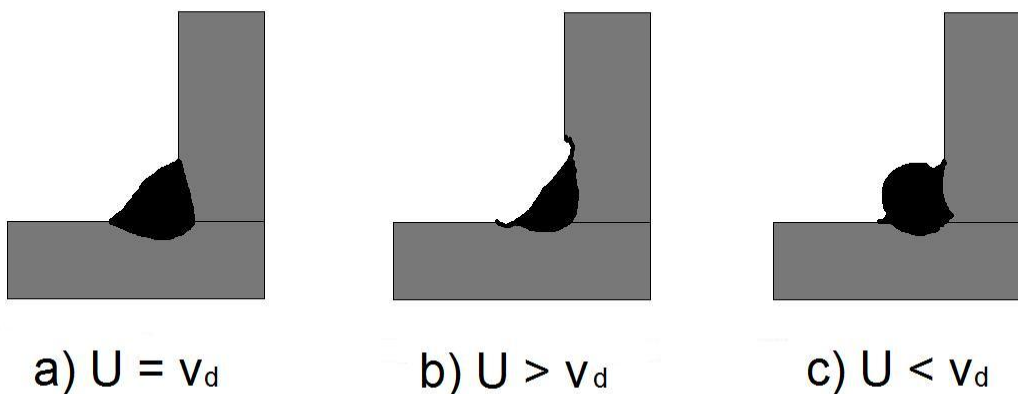
6.5 VLIV (U , I) NA VELIKOST PRŮTOKU PLYNU

Velikosti napětí a proudu má také vliv na velikost průtoku ochranného plynu. S rostoucími hodnotami napětí a proudu roste také hodnota průtoku ochranného plynu. Pro krátký oblouk se zkratovým přenosem je průtok plynu $8 - 12 \text{ l.hod}^{-1}$ a u přenosu kovu dlouhým obloukem se sprchovým přenosem i impulzního přenosu $12 - 20 \text{ l.hod}^{-1}$. [3]

Volba vhodného ochranného plynu má vliv na velikost pracovní oblasti. CO_2 má pracovní oblast malou, proto se jen velmi těžko nastavují při jeho použití parametry U a I . Při použití ochranného plynu argonu lze získat poměrně velkou pracovní oblast, ve které lze snadněji nastavit parametry napětí a proudu pro pracovní bod. [3]

6.6 VLIV (U , I) NA RYCHLOST PODÁVÁNÍ ELEKTRODY

Při zvýšení buď napětí, anebo proudu při zachování konstantní rychlosti podávání elektrody, se dostane pracovní bod mimo pracovní oblast. Jestliže není svařovací zdroj vybaven řídicím systémem, který tuto změnu zaznamená, a který by rychlost podávání zvýšil, dojde k tomu, že podavač nestačí dodávat přídatný materiál a dojde k prodloužení oblouku, což má např. u krátkého oblouku se zkratovým přenosem za následek nestabilní krátké zkraty vedoucí ke zvýšenému rozstříku a svaru s malým průvarem a zaoblenými prohlubněmi po okraji (obr. 26b). Pro zajištění opětovné stability oblouku je nutno zvýšit velikost svařovacího proudu a současně úměrně s tímto i rychlost podávání elektrody, tím je dosaženo vyšší hladiny pracovního bodu v pracovní oblasti, ale velikost vnesené tepelné energie do oblouku, což je nežádoucí u materiálů malých tloušťek, kde hrozí propálení. Ukázka svaru při umístění pracovního bodu do středu pracovní oblasti při konstantní rychlosti podávání elektrody zobrazuje obrázek (obr. 26a) a při snížené hodnotě napětí (obr. 26c). [3]



Obr. 26 Zobrazení tvaru svaru v závislosti napětí na podávací rychlosti elektrody [3]

ZÁVĚR

Hlavním důvodem vypracování této práce byla má snaha pochopit procesy, které ovlivňují přenos kovu skrz oblouk do svarové lázně a jaký vliv mají tyto procesy na výslednou kvalitu a tvar svaru. Jde o složitý proces ovlivňovaný mnohými parametry. Musí být zajištěno konstantní podávání přídavného materiálu, aby nedocházelo k nestabilnímu hoření oblouku. Nestačí pouze nastavit hodnoty napětí a proudu, ale mělo by být bráno v potaz také použití ochranného plynu, typ svařovaného materiálu, volba vhodného typu přenosu kovu, rychlost podávání elektrody, průměr elektrody a její výběh ze svařovací hubice, vzdálenost hubice od svařovaného materiálu, polarita zapojení a také volba svařovací polohy. Vhodné nastavení pracovní oblasti a pracovního bodu mi dovolilo pochopit, jak je toto důležité na velikost vnesené tepelné energie do svarové lázně i výslednou kvalitu a tvar svaru.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení*. 1.vyd. Ostrava : ZEROSS, 2001. 395 s. ISBN 80-877-81-0
- [2] ONDREJČEK, P. *Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou : Fyzika, metalurgia, technológia, automatizácia*. 1.vyd. Bratislava : Eterna press s.r.o, 2003. 202 s. ISBN 80-968359-5-5.
- [3] Firemní podklady firmy AGA. [VHS kazeta] Svařování metodami MIG/MAG
- [4] Informační web pro žáky SOŠ a SOU Pobořany [online]. Dostupné z WWW: <http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-t2-15_obloukovesvarovanimigmag.pdf>
- [5] Svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 4.11. 2010, last modified on 22.4. 2011 [cit. 2011-05-23]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD_v_ochrann%C3%A9_atmosf%C3%A9%C5%99e_tav%C3%ADc%C3%AD_se_elektrodou>.
- [6] The Indian institute of welding – Mumbai [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.theiiwmumbai.8m.com/migwelding.htm>>
- [7] Linde Gas [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.lindegas.de>>
- [8] Ewing engineering contractors [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.ewings.co.nz/weldingprocedure.html>>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

MIG	Metal Inert Gas – obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném inertním plynu
MAG	Metal Active Gas – obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném aktivním plynu
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding – obloukové svařování v ochranném plynu wolframovou elektrodou (TIG)
GMAW	Gas Metal Arc Welding – svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu (MIG/MAG)
FCAW	Flux-Cored Arc Welding – obloukové svařování trubičkovou elektrodou v ochranném plynu
MMAW	Manual Metal Arc Welding – ruční obloukové svařování
SAW	Submerged Arc Welding – svařování pod tavidlem
GMAB	Gas Metal Arc Brazing – pájení tavící se elektrodou v ochranném plynu
PAW	Plasma Arc Welding – svařování plazmou

Zkratka / Symbol	Jednotka	Popis
\vec{B}	[-]	Vektor magnetické indukce
C_d	[-]	Koeficient zohledňující proudění plynu vyjádřený jako funkce Reynoldsova čísla Re
D	[-]	Konstanta oddělení kapky
F_d	[N]	Síla hydrodynamická
F_e	[N]	Síla elektromagnetická
F_g	[N]	Síla gravitační
F_s	[N]	Síla povrchového napětí
F_v	[N]	Síla vyvolaná tlakem kovových par
I	[A]	Elektrický proud
I_0	[A]	Okamžitá hodnota proudu
I_p	[A]	Proud impulsu
I_s	[A]	Svařovací proud
\vec{J}	[-]	Vektor proudové hustoty
L_c	[H]	Celková indukčnost svářecího okruhu
R	[m]	Poloměr
R_c	[Ω]	Celkový odpor svářecího obvodu

T_p	[s]	Doba trvání impulzu
U	[V]	Napětí
U_{20}	[V]	Napětí naprázdno
V	[m ³]	Objem
a	[-]	Kapilární konstanta
d	[mm]	Průměr
d_a	[mm]	Průměr obloukového sloupce
f	[Hz]	Frekvence, frekvence impulzů, frekvence zkratů
$(f_e)_r$	[-]	Vyjádření radiální složky elektromagnetické síly
$(f_e)_z$	[-]	Vyjádření axiální složky elektromagnetické síly
g	[m.s ⁻²]	Gravitační zrychlení
l	[m]	Délka
m	[kg]	Hmotnost
p	[dyn.cm ⁻²]	Tlak
r_d	[m]	Poloměr kapky
t	[s]	Čas
t_p	[ms]	Čas impulzu
v	[m.s ⁻¹]	Rychlost
v_d	[m.s ⁻¹]	Rychlost podávání elektrody
x	[m]	Vzdálenost
η	[N.s.m ⁻²]	Viskozita
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelná vodivost, součinitel tepelné vodivosti
μ_0	[N. A ⁻²]	Permeabilita vakua
π	[-]	Ludolfovo číslo
ρ	[kg.m ⁻³]	Hustota
ρ_m	[kg.m ⁻³]	Hustota tekuté kapky
ρ_v	[kg.m ⁻³]	Hustota par